U.D.C 621.315.05: 621.3.015.532

# 超高圧送電線コロナの基礎的考察

— 小 球 対 平 板 電 極 の 交 流 コ ロ ナ パ ル ス 特 性 ―

Basic Study of Corona on Extra-High Voltage Transmission Lines — A.C. Corona-Pulse Characteristics of Needle-Plane Point Corona —

> 永野宏郎 Hiroo Nagano

### 內 容 梗 概

超高圧送電線のコロナ雑音は試験送電線や超高圧同心円筒などを使用して研究を行っているが,導体や付 属金具などのコロナ放電点は広範囲にわたって分布し,さらにコロナ放電によってできたコロナパルスの伝 ぱんなどの問題があり複雑である。そこで、コロナ放電を単一化して調べるため、小球対平板電極による交 流コロナパルスの研究を行った。

この結果,正負コロナパルス数および波高値は正規分布に近いこと,負コロナ波高値はほとんど一定で印 加電圧とパルス数との間に一定の関係があること,正コロナパルス数はほとんど一定で,波高値は印加電圧 の上昇とともに増大することなどがわかった。

さらに降雨時のコロナを調べるため,上部電極より水滴を滴下させて模擬し,その基本特性を調べた結果, 交流コロナパルスの基本的特性がより明らかとなった。

— 91 —



電力需要の増大に対して送電電圧はますます高くなり 1000 ~ つつあるが、この結果、架空送電線の導体および付属金 50~A.C. ~ 具などはコロナ雑音をできるだけ軽減する対策が研究されている。しかし、これらのコロナ雑音はその原因が、 コロナが電によって発生する非常に急しゅんな立上りの コロナパルスであって、その発生位置は種々分布し、複 雑な伝ばんを行うため、問題の解明は容易でない。たと えば導体のコロナ雑音は試験送電線や超高圧同心円筒に よって盛んに研究されているが、これはあくまで実用上 のデータをとるためである。しかし、これらの試験結果 をさらに分析し、コロナパルスの微視的解明を行うとすれば、おのおののコロナ放電点でどのようなコロナパル ス特性が存在しているかどうか、一点より発生するコロ ナパルスのバラツキや分布がどのようになっているかを究明してお かなければならない。

1. 緒

言

さらに降雨時には導体や金具に水滴が付着し, コロナ放電は主と してその水滴の先端より発生するので, コロナ雑音は晴天時に比べ て異常に増大する。この場合, 水滴先端よりのコロナ放電は乾燥時 (晴天時)と比べて著しく機構が異なると考えられるが, これも水滴 を単一化して解析する必要がある。

本報告は以上のような目的のため, コロナ放電点を単一化した小 球対平板電極のモデルによってコロナパルス特性を調べたものであ る。

### 2. 実験概要

第1図は小球対平板電極によるコロナパルス測定回路である。高 圧変圧器の一次側電源は定電圧装置(変動率2%)を通して電圧調 整器により供給されている。電源変動1%としても2次側では10~ 20kVの印加電圧に対し、150~200V変動するため、コロナパルス 数が大きく変ることがわかったので高圧側電圧を分圧整流し標準電 池電圧と比較し変動分をマイクロアンメータで検出することによっ て電圧変動を押えるようにした。この結果電圧変動率を0.1%以下 に押えることができて実験の確度が良くなった。なお電極への印加 \* 日立電線株式会社

第1図 針対平板電極モデルの交流コロナパルス測定回路

電圧は静電電圧計によって測定した。

高圧試験変圧器から測定電極への電圧は試験変圧器の内部および 外部コロナパルスを押えるためπ形フィルタを通して印加した。小 球対平板電極に発生したコロナパルス電流は平板の接地側抵抗を通 して同軸ケーブルによりパルス計数装置に導かれ、また広帯域シン クロスコープにより波形を観察できるようになっている。

一方,個々のコロナパルスの放電電荷量を調べるため正および負 の半サイクル間に流れる平均コロナ電流を測定した。第1図中のコ ロナ電流測定回路は正および負の半サイクルにおけるコロナ電流の 平均値を別々に求めるもので,位相調整器によってチョッパの動作 を印加交流電圧の零点に完全に同期させ,半サイクルのみのコロナ 電流を整流して検流計によって測定した。この場合,検流計には電 極間容量による充電電流が流れコロナ電流と重畳する。しかし,充 電電流は印加電圧に比例して直線的に増加するのでコロナ電流を容 易に分離できる。充電電流の位相は印加電圧より90°進んでいるた め,充電電流をチョッパで切ることになるが,この影響はほとんど なく,全く無視できた。 コロナパルスを測定したモデル電極は第2図に示すような構造で

ある。すなわち, 平板電極は直径約50mmø, 厚さ10mmの真鍮円 板で, 針電極は直径それぞれ2.37, 3.17, 3.97, 5.56mmøの4種の クロームメッキ鋼球を使用し, これを針でつるしロッドに取り付け 800 昭和36年6月

た。これは針端電極では正確に先端の曲率半径を調整するのが容易 でなかったからで,このようにした結果,放電による電極表面の変 化を少なくすることができた。なおギャップ長は小球を取り付けた ロッドによって調整できるようになっている。

降雨時水滴先端よりのコロナ放電を模擬させる場合には水滴は上 部電極におかれた水槽よりサイフォンで電極に導き、サイフォン管 を調節することによって滴下量を 0.1cc/min から 10cc/min 程度変 化させ,降雨量の変化に対応させた。この場合,平板電極は滴下す る水滴が電極表面に盛上るので、これを除去するため、細い目の網 目状とし,端部はコロナ発生しないように丸みをつけたものを使用 した。この場合,水滴の電気力による飛散を考え,網目状平板電極 

コロナパルス計数装置は第3図に示した、そのブロックダイヤグ ラムのように正および負の半サイクル中に発生するコロナパルス数 および波高値の分布を測定できるようになっている。

小球対平板電極におけるコロナパルスは正負とも10分の数 µsの 幅をもち、負コロナパルスは交流半サイクルに数百個を含む、振幅 は0.1~1mA, 電極に直列に入れた抵抗両端の電圧でmVのオーダ であるため高増幅度広帯域増幅器によって増幅する。コロナパルス の振幅特性を測定するには所要の周波数成分に対して平担な増幅特 性が必要である。電極に直列に入れた抵抗の両端から取り出したコ ロナパルスは高域沪波器を通して、重畳している電源周波充電電流 を除いてから増幅器に入れる。増幅器は 4 Mc/s まで完全な周波数 特性をもち, 60dBの増幅度をもっているので, コロナパルスに対 しては十分である。正負コロナパルスは各々極性が反対であるた め,極性変換回路を通して常に負のパルスとしスライサゲートに入 れる。スライサゲートはコロナパルスの波高値分布 を調べるもので,これによって与えられた振幅以上 のパルスだけが次の波形成形回路にはいり、一定振 入力 ∽ 幅,一定幅のパルスに直される。 正および負のコロナパルスを別々に計数するには 電源周波の正および負の半波に同期してゲートを開 閉する「正負サイクル選択ゲート」をおき、ゲート の位相は移相器によって印加される高圧交流と同期 始動↔ される。波形成形回路の最小トリガ入力は1Vであ り、したがってコロナパルスは0.1mVの入力まで計 A. C. 50 % 数できる。計数回路は1けた目に真空管による10進 100V 回路と2および3けた目にデカトロン計数管を使用 し,計数装置の分解能は最初の1けたについては 2 Mc/s まで応答するが、2 けた目よりデカトロン の応答速度に制限され全体として 50 kc/s 程度であ る。したがって電源周波の半サイクルの間にコロナ パルスが一様に分布するとして、計数能力は500個 までである。



#### 3. 実験 結 果

### コロナパルス数の変動 2.1

コロナ現象の測定においては電極の状態、気象条 件,その他の条件をよく押えても,再現性が乏しい のではないかと思われる。事実、コロナパルス数の 予備実験においては同一の条件でも相当のバラッキ があるように思われた。このため,周囲条件を一定 にした場合, コロナの本質としてどの程度のバラツ キがあるかを実験の初期段階として調べた。 電極の表面にほこり,油などが付着するとコロナ は変ることが予想されるので測定のたびにベンゾー



第3図 コロナパルス分布計数装置のブロックダイヤグラム



500 r

ルによって電極表面を洗浄し,気象条件もなるべく一定 にした。

初めは測定の中途において分布レベルが急に変化し, しかもその変化に周期性のようなものが見られ,長時間 の測定はできないように思われた。これは電源電圧の変 動によるもので第1図のような回路によって印加電圧の 変動率を 0.1%以内に押えたため現象が安定になり, 良好な再現性が得られた。

第4図および第5図はこのようにして測定された正お よび負の交流コロナパルス数の一定条件下における分布 ヒストグラムである。

正コロナパルスは10 サイクル中,正の半サイクルのパ ルス数を計数し1 サイクルに換算したもので,負コロナ パルスは負の半サイクルのパルス数実測値そのままであ る。この測定は正負どちらも500回以上測定したもので ある。第4図および第5図よりコロナパルス数の分布は 正規分布することがわかる。これより平均値µおよび標 準偏差 λ を求めたが,これを図中に示してある。

これらのコロナパルスの本質的な分布は他の電極やギ ャップ長についても測定されたが,分布傾向は同じであ った。これより正負コロナパルスの分布について次のよ うに要約される。



(a) コロナパルス数は正規分布をする。その変動係数は10%以下である。

(b) 負コロナパルス数の分布は印加電圧が増すと大きくなる。しかし変動係数は減少する。

(c) 正コロナパルス数の分布の幅は負コロナパルス より小さい。しかも印加電圧の上昇にしたがって分布 範囲は狭く安定になる。

3.2 正および負コロナパルス数と印加電圧の関係

以上コロナパルスの本質的なバラツキの状態が予備実 験結果でわかったので、この平均コロナパルス数が印加 電圧に対して一定気象条件下でどのようになるか調べて みた。

第6図は印加電圧による負コロナパルス数の平均値の 変化を示したものである。すなわち電極として2.37, 3.17, 3.97, 5.56 mm¢の4種を用い, ギャップ長20お よび 30 mm について実験したもので, 横軸にはコロナ 開始電圧と印加電圧の差で示し, 対数目盛グラフに画い たものである。

この結果,球の大きさによる差はほとんどなく,ギャップ長が短いほどパルス数は多くなる傾向にある。

一方,正コロナパルスは負コロナパルスと傾向が全然 異なり,第7図のヒストグラムにも示したとおり,毎サ イクル1個程度である。これをグラフで示したのが第7 図であって,電圧によってほとんど変化しない。さらに電圧を増加 するとパルス数は急激に減少し破壊に至る。破壊寸前では正コロナ パルスの発生はなく,コロナパルスが出るとともに破壊するように 思われる。5.56 mm Ø 球においては,1サイクル中に1個以上発生



第6図 負コロナパルスの1サイクル当り平均発生数の電圧特性

ているか調べるため、スライスをかけ各スライス電圧以上の波高値 をもつパルス数の分布を求めた。この結果は紙面の都合で省略する が、やはり 第4、5図と同様な正規分布をすることがわかった。 第8図および第9図は正コロナおよび負コロナの各スライス電圧 における平均コロナパルス数を示したものである。これから負コロ ナパルスはほとんど一定波高値のパルスから成立っていることがわ かる。これに対し、正コロナパルスは第4図でも示したように1サ イクル中にほとんど1個であるが、その波高値は毎サイクル一定で なく負コロナに比べて広い分布をしていることがわかる。一方印加 電圧に対しては正コロナパルス波高値は電圧の上昇とともに増大す るが、負コロナパルス波高値はほとんど変化しない。しかしいずれ

するが、これは球が大きいため、表面の1箇所以上の点より正コロ にお ナが発生するためで、平等電界に近づくため、コロナ開始から破壊 ナパ までの電圧範囲は狭く、破壊直前にコロナがなくなる現象は測定で かる きなかった。 イク 3.3 コロナパルス波高値分布 なく コロナ雑音はコロナパルス波高値に直接比例するため重要な特性 電圧 である。正および負のコロナパルスがどのような波高値分布をもっ るが



i ka

— 94 —

ど大となっている。

3.4 コロナパルス放電電荷量とコロナパルス波形 第1図に示したコロナ電流測定回路の測定結果から充電電流を差 し引き,パルス数で割った値からコロナパルスの平均放電電荷量を 算出した。第10図はこの結果を示す。この結果、負コロナパルス の平均電荷量は 10-10 クーロンのオーダで、これに反し正コロナパ ルスは10-8~10-7クーロンのオーダで、負コロナパルス100~1,000 個に対し, 正コロナパルス1個の放電電荷重に対応する。もっとも













(a) 印加電E 10kV





(b) 印加電圧 11kV

(d) 印加電圧 15kV

第12図 負 コ ロ ナ パ ル ス 発 生 位 相 (印加電圧零で掃引開始)

このようなコロナ電流より測定した結果はコロナ放電がすべてパル ス性のものであるが、正確を期するためには無パルス性のものも考 えなくてはならないので、大体のオーダを示したに過ぎない。したが ってコロナパルス波形を忠実に測定する必要がある。第11図(a), (b) はそれぞれ正負のコロナパルス群の波形でシンクロスコープ により多重観測されたものである。この結果正負コロナパルスとも その幅はほとんど一定であり、その波高値は前述したように第8, 9図のように分布していることがわかる。また負コロナ発生位相を 調べるため、電極の印加電圧を分圧し、これを重畳してコロナパル ス発生位相を調べた。第12図はその一例であって、正コロナパル スは印加電圧を増すと発生位相が進むのみで数は変らず、毎サイク ル平均1個前後でその波高値は大きくなる。これに反し、負コロナ パルスは発生位相範囲が広がりパルス数は増大する。

3.5 正負コロナパルスの発生と空間電荷

電線ではストリーマコロナである)に着目され,交流コロナパルスの研究も活発になってきている<sup>(4)(5)</sup>。

交流コロナパルスの発生機構は本質的には直流コロナパルスの場合と変らないと考えられ、しかも、直流の場合はコロナパルス発生 機構についてある程度明らかにされているので、これらの研究結果 から、上記実験結果を定性的に考察してみたいと考える。

コロナパルスはコロナ放電によって起る空間電荷が,電界と差動 的に働き,偶存イオンの供給や空間電荷のゆらぎによって放電がパ ルス的に行われるので,コロナパルスのようすは空間電荷の様相に よって異なってくる。

負コロナの場合は、電極からの電子放射によって形成された密度 の高い正イオン雲が針電極の周囲をとり巻くので、第6図のように コロナ開始電圧以上では、ギャップ長にあまり影響をうけない。ま たコロナパルスを発生する電子なだれは正イオン雲のため一定距離

コロナ放電がパルス的現象を示すことは G. W. Trichel (1)(2)氏な	に押えられ、コロナパルス波高値も第9図のように低く、ほとんど一
どによって発見され、L. b. Loek 氏などによって直流コロナパルス	定である。印加電圧を増すと,正イオン雲の量が増大するのみで,
の研究や機構が説明されている(3)。当時は送電電圧も低くコロナパ	針端電極の電界はほとんど変らず、正イオン雲を多量形成するため
ルスの無線通信への影響もほとんどなかったので、コロナパルスの	の電子放射が負コロナパルス数増加となって現われるのみである。
研究は気中放電現象の一つとして、学問的興味より研究されている	これに対し, 正コロナの場合は負コロナとは全く異なり, 針端電
状況であった。しかし,ここ数年来,超高圧送電線から発生するコ	極よりの放電は正ストリーマとなって、印加電圧が高い場合は対向
ロナパルスがラジオ障害の原因であるところから特に正コロナ(送)	電極までも進展する。しかしそのエネルギーは大きく、したがって

---- 95 -----





リーマの伸展は、気体や残留電荷のによって影響されるため、毎サ イクルの波高値は第8図のように広範囲に分布する。

3.6 水滴先端よりのコロナ

超高圧送電線のコロナは降雨の場合非常に増大する。しかしこの 現象を詳細に観察すると、コロナ放電は電線に付着した水滴の先端 より起っていることがわかる<sup>(6)</sup>。すなわち、水滴自身が強い電界に おかれるため,水滴表面電荷による静電力が水滴表面張力より大き くなって下面がせん鋭となり、低い電圧でコロナ放電を起すととも に水滴が大きくなれば、ついに分離滴下する。この場合は特殊なコ ロナ放電を起すと考えられる。

水滴がせん鋭とたり、コロナ放雷を起す状能は針対平板雷極の実

第14図は水滴滴下量を変化させた場合のコロナ雑音の様子であ って、参考までに直流の場合も示した。また第15図は同様にコロ ナ損についても示した。これらの実験結果からわかるように、コロ ナ雑音は滴下量1cc/min以上ではほとんど増加しない。それ以下で は滴下量とともに減少し、 0.1cc/min 以下では乾燥状態に近づき、 ついにはコロナは発生しなくなる。一方コロナ損は滴下量とともに 増加し、 滴下量1cc/min 以上でも増加がみられる。この実験で、 1cc/min 以下の滴下量では水滴の形状が小さくなるので、このよう た特性になったものと思われる。 雨量が増加すると,導体や付属金具に付着す ロナ雑音は急激に増大し,降雨量数mm/h以 飽和し,ほとんど変らない。本実験では,水 下量を変えているが、水滴の形状が静電力と 長した場合は(滴下量1 cc/min に相当する) させてもコロナ雑音が増加しないことがわか とともに少し増加するが、滴下する水滴によ

不同的 已加出了,一下,从电子仍是你到对于放电型少天	は国民にようにものとれ
験結果から推定することができる。しかし、水滴が滴下分離すると	実際の送電線では降雨
きの現象は別の実験により検討しなければならない。	る水滴の数が増加しコロ
この現象は相当複雑であるので,その特性を巨視的に調べるため,	上では, コロナ雑音は食
水滴滴下量を変化させて実験した。この場合、針端電極は先端曲率	滴を単一化してその滴
半径を大きくして、水滴が付着していない場合は試験電圧でコロナ	釣合う大きさにまで成長
を発生しないようにしている。第13図は水滴先端よりのコロナ放	滴下量をそれ以上増加さ
電状況をストロボを使用して瞬間撮影したものである。	る。コロナ損は滴下量と

96 —

り持ち去られる電荷のために損失が増加すると考えられる。しかし 全体のコロナ損よりみて、この損失はわずかであり、大部分は水滴先 端より気中へのコロナ放電現象が主役をなしていることがわかる。 したがって、水滴先端よりのコロナ放電も本質的には針対平板電極 の場合と変りなく、ただこの場合は気中の水蒸気分子にイオンがト ラップされ、空間電荷の移動が抑制される結果、さきに述べた電界 への影響を考えなければならないと思う。

水滴先端よりのコロナパルスについては第1図と同様な回路でコ ロナパルス数分布を測定することを試みたが、水滴先端が静電力に よって著しく変化するため、一定の傾向はみられなかった。しか し、正および負コロナパルス波高値に対しては第8図および第9図 と同様な特性であることがわかった。第16図は第1図の検流計の 代りにノイズメータを入れて測定した正および負コロナパルスによ るコロナ雑音の一例である。

## 4. 結 言

以上,超高圧送電線のコロナ放電を単一化して調べるため,針対 平板電極をモデルとして使用し,その正および負の交流各サイクル におけるコロナパルスの変動,平均数,波高値分布,放電電荷量な どを調べるとともに,降雨時,水滴先端よりのコロナ放電について も比較実験した。この結果,交流コロナパルスの基本特性がより明 確となり,超高圧送電線コロナパルス解析上有効な手掛りを見出す ことができた。なお降雨時水滴先端よりのコロナ放電については, さらに光学的研究も進める必要があるので,これについてはさらに 研究を続行する予定である。以下本文を要約すると次のようになる。 (1) コロナパルスは正,負とも,発生数および波高値は本質的に 正規分布をする。しかし,負コロナパルス波高値は正コロナパル ス波高値に比べ変動は少なく,波高値は正の数百分の一である。 (2) 負コロナパルス数は印加電圧とともに増大するが,正コロ ナパルス数は毎サイクル平均1個程度である。しかし,放電電荷 量は正コロナ1個は負コロナ数百個に相当する。

(3) 降雨時水滴先端からのコロナ放電は、本質的には針対平板 電極のそれと変りないが水滴滴下量が少ない場合は影響がある。
(4) 水滴滴下分離のときの放電現象についてはさらに研究が必要である。

最後に、本実験に当ってご協力をいただいた日立電線株式会社, 沼尻、田中、遠藤、志賀の諸氏に厚くお礼を申しあげる。

### 参考文献

(1) G.W. Trichel: Physical Rev. 54, 1078 (1938)

- (2) G.W. Trichel: Physical Rev. 55, 382 (1939)
- (3) L.B. Loeb: Physical Rev. 86, 256 (1952)
- (4) 永野, 沼尻: 電東京支大 No. 211 (昭 34-11)
- (5) 永野, 沼尻: 電四連大 No. 924 (昭35-7)
- (6) 永野, 沼尻: 日立評論 別冊 35 号 9 (昭 35)

### 石炭水力輸送装置の閉塞防止兼水撃防止装置

石炭水力輸送装置では,停電によってポンプが非常停止すると, 輸送管中の石炭が沈でんして閉塞を起し,再起動が不能になる場合 がある。これを防止するのが本考案である。

平常運転時には,原動ポンプの吐出側に連結した輸送管にロック チャンパから石炭を送入して坑外に運び出す。停電すると電磁弁が 切換えられ,非常排出弁の操作シリンダを排油に連通させて非常排 出弁を開き,石炭混合水を全部排出する。このときの非常排出弁の 開弁速度は排油路に設けた絞り弁の開度に応じて調節することがで きる。

原動ポンプを正常に停止するときには最初に制水弁を閉じるから,制水弁に設けた接点の閉路によって電磁弁の操作回路を保持し, 非常排出弁は開かないようにしてある。

本考案は以上のように、ポンプの非常停止時には輸送管内の石炭 混合水を排出して閉塞を防止し、同時に非常排出弁の開き速度を調 節することによって輸送管内に生ずる水撃作用をも確実に防止する ものである。(鳥塚)

