研究速報

UDC 537.525

棒-平板ギャップ中の空間電荷の測定

Measurement of Space Charge Distribution in Rod-plane Gap

河村達雄*・石井勝*・松本隆宇*
Tatsuo KAWAMURA Masaru ISHII and Takaie MATSUMOTO

1. まえがき

近年の電力需要の増大に伴って，送電々圧は上昇の一途をたどり，現在我国では500 kV級送電線が運用されており，1000 kV級送電の研究開発も行われている．かかる高電圧を絶縁して取り扱う関係上，送変電機器も，ますます大型化しており，大気によって絶縁される距離も長大なものとなってきている．

このように長大なギャップにインパルス電圧を印加した際のフラッシオーバ電圧は，ギャップ長に対して飽和する特性を示し，その放電機構は現在のところ十分に解明されていない．本報告は，長ギャップ放電の初期の状態であるファーストコロナの性質を調べることを目的として，20 cm棒－平板ギャップに開閉インパルス電圧を印加した際に発生する空間電荷の挙動について研究したものである．

ギャップ中の空間電荷分布を求める研究は，フィールドミルで電界を測定して分布を推定する方法や[1]，ギャップ中に絶縁物の板やシートを置き，電圧印加終了後に付着した残留電荷を表面電位計で測定したり，ダスト図等の形にして観測する方法[2),3)]等があるが，いずれも時間的に放電が進展していく様子をとらえることはできない．

一方，イメージコンバータカメラ等の機器を用いて光学観測する方法は，高い時間的分解能を有するが，発光強度と，電荷密度との対応が明らかでなく，空間電荷の定量的な解析はできない．今回，複数個のプローブを平板上に設けて静電界の時間変化を計測し，同時に高電圧の棒電極からの放電々荷量をオプトエレクトロニクスを応用した信号伝送装置を用いて測定するとともに，イメージインテンシファイアによる写真観測を行うことによって，時間的に進展していく放電の空間電荷の分布を推定した．

2. 実験装置

電極は，種々の条件を考えて3 mmφの黄銅製半球棒（図1）と710 mmφアルミニウム製簡易ロゴウスキー電極（図2）を用いた．両電極とも図に示すように多重に分割してあり，電荷量，表面電界が測定可能である．ギャップ長は20 cmとした．印加電圧は，（200×1800）μsの開閉インパルス，極性は正である．

測定諸量は，高電圧棒電極から，放電々荷量（Q_m）と電界（E_H），ギャップ軸上電界（E_0），ギャップ軸から8

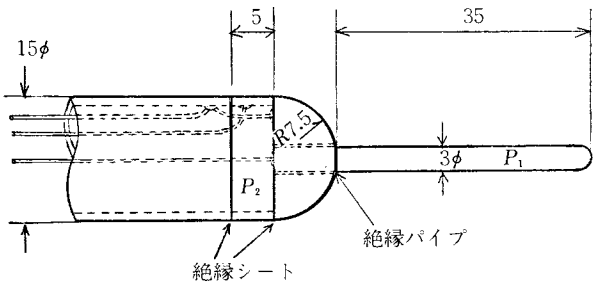

図1　棒電極

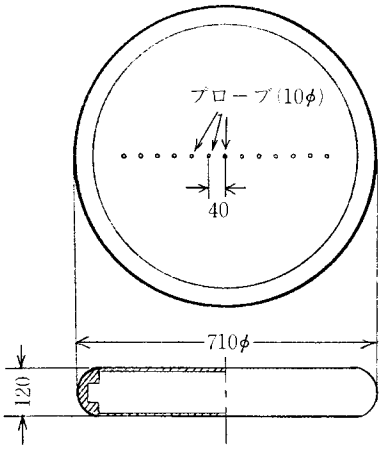

図2　平板電極

*東京大学生産技術研究所　第3部

cm, 20 cm の所の電界 (E_8, E_{20}), さらに電圧 (V) とギャップ全体の発光をホトマルにより観察したもの(L)の7個であり, 同時にイメージインテンシファイアによる静止写真を撮影した. 電荷重畳法により計算した静電界は, 棒電極先端で 391 kV/cm (100 kV 印加時)平板電極中央で 0.85 kV/cm(同) である.

棒電極からの信号伝送に用いた光学式プローブは入力インピーダンス 4.7 MΩ, 帯域 DC～ 12 MHzの性能であり, この装置によって初めて放電々流波形の積分を高電圧側で直接行うことが可能となった.

3. 実 験 結 果

ギャップ長 20 cmにおける 50 %フラッシオーバ電圧は, 110.3 kV, σ = 2.1 kVであった. 棒電極のプローブ P_1 (図1参照)の対地静電容量は, 実測で 3.4 pF, 電界計算によると 3.3 pFであり両者は良く一致した. 平板上のプローブの感度は, ギャップ軸から 0, 8, 20 cmの所で各々, 9.44 kV/cm/V, 4.84 kV/cm/V, 1.99 kV/cm/V であった.

印加電圧 U= 88.2 kVのときのオシログラムとイメージインテンシファイアによる写真を図3, 4に示す.

コロナの発生はパルス状で, 各パルスの電荷量は 0.01～ 0.04 μCであり, 波頭部分のパルスが大きく, 波頭を過ぎると, パルスが小さくなり, 数が増えることがわかる.

平板電極上の電界強度について見ると, ファーストストリーマコロナによって 400 V/cm～ 700 V/cmステップ状に増加し, 印加電圧が高いと, 電極中央部の電界の増加の割合が, 周辺部のそれと比べて大きくなり, さらに波尾の部分 (t> 200 μs)で, ステップ状の電界の増加以外に, 直線的な電界の増加成分が観測されるようになる. すなわち, 空間電荷が平板電極の方に近づいていることを意味し, 放電が, 進展していることがわかる.

観測される放電電荷量と平板上の電界のステップ状の増加量の関係をくわしく見ると, 電荷量は時刻とともにステップの大きさが小さくなるが, 電界の増加は, それほど小さくならず, t> 300 μs の所では再び大きくなる場合すらある. 測定される電荷量は, 電極内に誘導される影像電荷の量だけ少なく観測され, 電極近くで発生した空間電荷ほどその効果が大きいことを考えると, 発生する空間電荷量は, 時間とともに急激に減少していると考えられる. 放電の進展する空間の広さが, 逆に, 時間とともに大きくなることを考え合わせると, 空間電荷の電荷密度はストリーマの先端に行くほど小さくなることが予想されるが, これは, リヒテンベルグ像やダスト図を用いた研究結果と相異している.

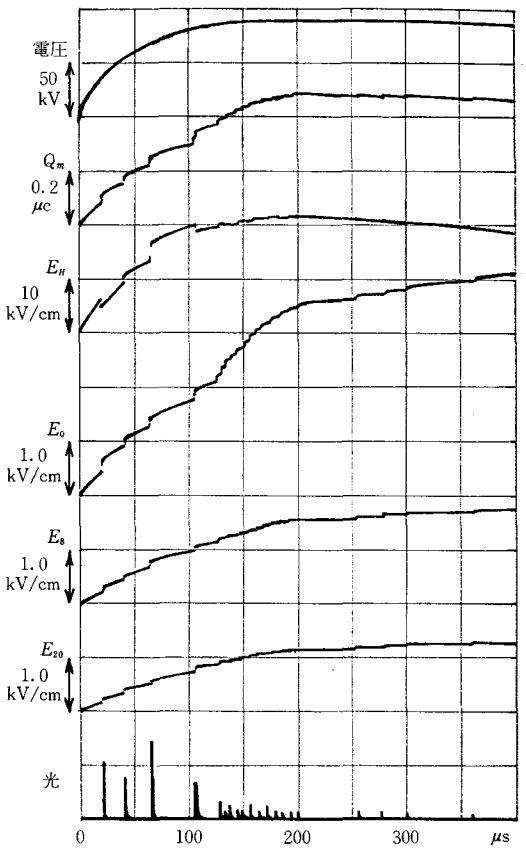

図3　測定波形オシログラム

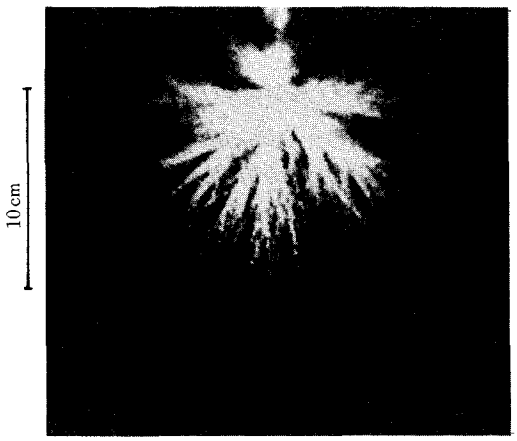

図4　イメージインテンシファイアによる写真

一方, 棒電極上で測定した電界 (E_H)について見ると, コロナの発生によって, 減少したり増加したりしているように見える. 始めのコロナの発生で, 電界の緩和が起こり, 電界の減少が観測されることは, その時発生した

研究速報

空間電荷から出発する電気力線がプローブに来ていることを意味する．したがって，次の放電パルスが発生すると，発生した電子はその電気力線に沿って移動し，プローブに流入することになる．使用した静電プローブは，真電荷と誘導電荷を分離できないので，高電圧電極における電界の測定は，真電荷の流入に対して対策を考える必要がある．

しかし，写真観測とともに合わせ見ると，棒電極から平板電極と逆の斜め上方へストリーマの進展がみられることを裏付けており，下方で発生した空間電荷の緩和効果が大きく，電気力線が一時的に逆向きになる現象が起こることを示している．

次に，イメージインテンシファイアを用いた写真計測によってストリーマコロナの全領域が撮影可能であるか否かを検討した．ギャップ中に厚さ1 mmのアクリル板をギャップ軸に平行に置き，電圧印加時にイメージインテンシファイアを用いて写真を撮影し，電圧印加後ただちにイオウ粉末をアクリル板に散布しダスト図を得た．両者を比較検討したところ，ダスト図の先端部まで発光が撮影されていることがわかり，少なくともダスト図形として残在し得る程度の空間電荷存在領域は，発光領域として観測されることが明らかとなった．このため，印加電圧を種々の時間でさい断し，イメージインテンシファイアを用いて静止写真を撮影することにより，空間電荷存在領域の大きさと形状の時間変化を知ることができる．波高値88.2 kVの電圧を印加してさい断すると，さい断までの時間50 μs で直径2～3 cmの球状にコロナ発光が認められ，100 μs で直径約5 cmに，200 μs で直径6～7 cmにまで放電が進展する．

4. 解析および検討

前節の実験結果をもとに空間電荷の動的な分布を解析するわけであるが，各測定量はそのままでは使えない．電荷量は，印加電圧による充電々荷と空間電荷，影像電荷の和であり，電界もこれに準ずる．この取り扱いを検討する．

図5のQ_sに示すように空間電荷が分布しているとする．（軸対称を仮定する）このQ_sを代用する代用電荷Q_eを置く．このQ_eは，Q_sの密度分布に応じてその大きさを次式を満足する範囲で変えることができる．

$$Q_s=Q_{e1}+Q_{e2}+\cdots\cdots+Q_{en}$$

この電荷が平板電極の上方にあるものとして，電荷重畳法により，平板電極表面の電界（$E_s(x)$）と，本来棒電極のある位置の輪郭上の点の電位（V）を求める．

次に，上で求めた輪郭上の電位を反転し（－V），境界条件として，棒電極内に通常の代用電荷Q_eを置いて，

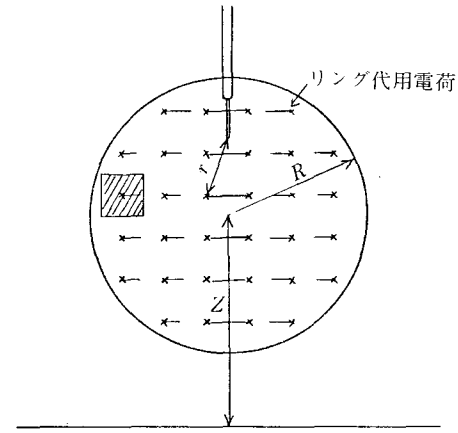

図5　ひろがりを考慮した電荷分布モデル

再び電荷重畳法を用いて計算を行う．得られた電界は，Q_sの影像電荷による$E_i(x)$であるし，電極内のQ_eの和は，影像電荷量を表している．

$$Q_i=Q_{e1}+Q_{e2}+\cdots\cdots+Q_{en}$$

測定される放電々荷量Q_mは，$Q_m=Q_s-Q_i$であり，Q_iはQ_sの分布の形が同じならばQ_sに比例するから，Q_m によりQ_sを定めることができる．

上記計算と静電界（E_u）から，$E=E_u+E_s+E_i$が計算できる．これを，測定より得られたE_xと比較することにより，空間電荷の分布を正しく求めることができる．

写真観測から，空間電荷は，ほぼ球状に分布していることがわかった．そこで，球内に空間電荷を分布させたモデルを用いて，ひろがりを考慮した解析を行う．

ストリーマの発生進展の機構から考えて，空間電荷の電荷密度Pは，棒電極からの距離rの関数と仮定することは極めて妥当である．ここでは$P(r)=A\exp(B\cdot r)$の形であるとの仮定を置き，実測に一致するようにA,Bの値を決定する．写真観測により決定した球内に電荷を置き，ストリーマ先端部の電荷量の多いもの（B＝10）から，少ないもの（B=－20）までBを4段階に変えて電界を計算し，$Q_s=Q_m+Q_i$に一致するようにAを決めた結果，B=－10で測定値を満足する．（印加電圧88.2kV）したがって，ストリーマの先端になるにつれて電荷密度が減少するような分布であることがわかる．電圧印加開始より70 μs と150 μs 後のギャップ軸上の電界を図6に示す．ここでの電界は，空間電荷がひろがりを持って分布している場合のものであり，ストリーマ中に局部的に集中している場合のそれとは異なる．しかしながら，ストリーマのごく先端近傍を除けば，ほぼ図6の形の電界分布をしているものと推定される．

ストリーマの先端付近の電荷密度は160～250pC/cm^3

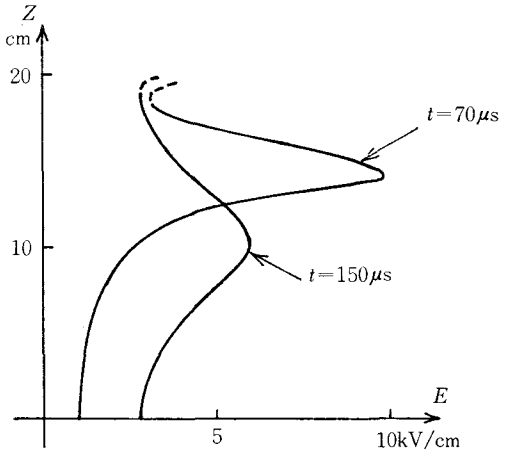

図6　ギャップ軸上◉電界（印加電圧 88.2 kV）

となり，写真による観察からストリーマ先端部で 1 cm² 当たり，1本程度存在するので，電荷量の全てがストリーマ中にあるとすれば，ストリーマの線電荷密度は 160 ～ 250 pC/cmとなる．この値は，長ギャップ中のストリーマをアクリル板に受け止めて，表面電位計を用いて測定した研究結果[2]とほぼ一致する．

5. 結　び

長ギャップ放電の初期の段階の放電機構を研究する目的で，20 cm棒－平板ギャップに開閉インパルス電圧を印加し，その際発生するコロナの挙動について測定を行った．棒電極，平板電極双方を分割し，電荷量，電界（多点）を測定し，光学的な観測と組み合わせることによって，空間電荷の動的な分布を推定できた．

本研究の遂行に当たり多大な援助をいただいた研究室諸氏に感謝の意を表する．なお本研究は，本所選定研究費の補助を受けてなされたものである．

（1981年3月31日受理）

参考文献

1）R. T. Waters, et al.: Proc. Roy. Soc. A 315, p 1（1970）
2）松山．堺:昭和53年電気学会大国大会　91
3）E. Nasser, et al.: J. Appl. Phys. **39** p. 3707（1968）