大気中負棒対平板ギャップの直流フラッシュオーバー過程

正員 常 安 暢 (福岡大)
 正員 生 澤 泰 二 (福岡大)
 正員 西 嶋 喜代人 (福岡大)
 正員 渡 辺 健 二 (九州電力)

1. ま え が き

近年、直流送電の長所が認識され、関連技術の進歩もあって、世界における設備容量は 30,000 MW に達しようとしている。我が国においても直流 ± 250 kV 送電線が完成し、次期送電圧として ± 500 kV が検討されており、その絶縁設計には直流放電現象の解明が不可欠である。また、放電現象の研究においては、電圧の変化が極めて緩やかな直流電圧印加時の現象が最も基本的なものと考えられ、物理的にも興味をもたれてきた。このような理由から数多くの研究がなされ報告されてきた。しかし不平等電界を形成するギャップについては、コロナの形態と形成機構、その開始電圧およびフラッシュオーバー電圧などに関するものが多く^{(1)~(5)}、フラッシュオーバー直前の状況に関する報告は少ない。これは、印加電圧の変化が緩やかで、フラッシュオーバー時刻の変動幅が極めて広いため、その直前の状況を観測することが困難であるからであろう。また、インパルス電圧印加時の観測結果から、高電界側電極が陰極のときの方が現象は複雑であると推測される^{(6)~(8)}。従って、このようなギャップのフラッシュオーバー過程に関しては鈴木らの観測のほかはほとんど報告されていないようである^{(9)~(11)}。

そこで筆者らは、直径が 2 cm の半球棒対平板ギャップに負極性直流電圧を印加したときのコロナとフラ

ッシュオーバー状況をイメージコンバータカメラなどを用いて観測し検討した。その結果、第 1 コロナはグロー状コロナであるが、後続コロナは次第に径が細くなってストリーマコロナに遷移することおよびフラッシュオーバー過程としては基本的には 3 種類の過程があることなどを明らかにした。本論文では、これらについて観測結果を例示しフラッシュオーバー過程の概念図を提示して述べる。

2. 実験装置と方法

先端が半球状で直径 ϕ が 2 cm の黄銅棒電極と直径 50 cm の銅円板電極を対向させた棒対平板ギャップを、ギャップ軸がほぼ鉛直になるように大気中においた。図 1 に示すように平板電極は抵抗 r_1, r_2 を経て接地し、棒電極はマイクロメータヘッドに取り付け、ギャップの長さ d は 0.2~7 cm の範囲で変化した。このギャップに直流高電圧発生装置 (ニチコン DCG 100 K 10 B) の発生直流負電圧を $0.1 \mu\text{F}$ の並列コンデンサ C と直列抵抗 R_s およびインピーダンス Z を経て印加した。電圧の調整は手動で行い、コロナ開始予想値の約 80% までは 1 kV/s 程度の速度で上昇し、その後は 0.05 kV/s 程度の速度で極めて緩やかに上昇した。またコロナ開始後更に電圧の上昇を要するときは 0.2 kV/s 程度で上昇し、フラッシュオーバー電圧の予想値付近では再び 0.05 kV/s 程度で上昇した。コロナ開始電圧、フラッシュオーバー電圧などの値としてはそれぞれ 10 回の測定値の平均値をとった。

放電状況はイメージコンバータカメラ (ICC)、イメージインテンシファイヤ (II) および静止カメラを適宜組合せて観測するとともに直接肉眼でも観測した。またギャップ全体を視野とする光電子増倍管 PM1 のは

DC Breakdown Processes of Negative Rod to Plane Gaps in Atmospheric Air. By Itaru Tsuneyasu, Member, Yasuji Izawa, Member, Kiyoto Nisijima, Member (Faculty of Engineering, Fukuoka University), & Kenji Watanabe, Member (Kyusyu Electric Power Co. Inc).

常安 暢: 正員, 福岡大学工学部電気工学科
 生澤 泰二: 正員, 福岡大学工学部電気工学科
 西嶋喜代人: 正員, 福岡大学工学部電気工学科
 渡辺 健二: 正員, 九州電力(株)

(a) 実験回路図

(b) 観測系統図

$R_2 = 0 \sim 4 \text{ k}\Omega$, $r_1 = r_2 = 200 \Omega$, $C = 0.1 \mu\text{F}$
 Z : 適宜設定, TPG: ICC起動パルス発生器, SY:
 シンクロスコープ, DM: デジタルメモリ, LED:
 発光ダイオード, PM: 光電子増倍管, ICC: イメー
 ジコンバータカメラ, II: イメージインテンシファイア

図 1 実験装置図

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup, also indicating triggering sequence.

かに、ギャップ軸で視野の上下幅が約 0.2 cm でその中心がそれぞれ棒電極先端近傍、ギャップ中央付近および平板電極近傍にある 3 個の光電子増倍管（上から PM 2, PM 3, PM 4）を使用した。ICC 始動用パルス発生器（TPG）の起動には、適宜 r_2 あるいは Z の端子電圧、PM 1, PM 4 の出力などによって始動したシンクロスコープ SY のゲートパルスを用いた。また、電流、光電子増倍管出力、ICC のモニターパルスなどの波形はデジタルメモリー（岩通 DM 902）によって観測した。

Z は抵抗とコンデンサを並列に接続したもので、常時は短絡しておき、ごく限られた現象の写真観測時にだけ使用した。その際、静電容量と抵抗は必要に応じ適宜に調整した。 R_s の値は小さすぎると前回までのフラッシュオーバーによる放電痕のため測定値の変動幅が大きくなり、大きすぎるとコロナ電流が抑制され、現象に与える影響が大きくなることが懸念される。そこで R_s の値はギャップの長さ d が 3 cm 以下では零とし、 d の増加とともに最大 4 k Ω まで増加した。この間 $R_s = 0$ のときの測定値と比較し、差異のないことを確かめた。

ギャップは水銀灯（東芝理化学用水銀ランプ SHL-100 UV-2）で紫外線を照射した。測定値はすべて照

射時の値である。ICC による観測も照射のもとで行ったが、放電に伴う発光のほかに電極表面などにおける照射光の反射も観測されるので、両者を識別するために非照射時の観測も行った。しかしフラッシュオーバー過程には照射の有無の影響は認められなかった。

実験は広い空間の開放大気で行ったので湿度の制御はしなかったが、相対湿度は 50~60% であった。

3. 実験結果と考察

〈3・1〉 放電特性 最初に発生進展するコロナすなわち第 1 コロナの進展開始電圧 V_c 、無パルスコロナの開始電圧 V_o およびフラッシュオーバー電圧 V_f と d との関係は図 2 に示ようになる。本論文では、 $V_f = V_o$ なる領域、 $V_f > V_o$ で無パルスコロナが認められない領域および $V_f > V_o > V_c$ なる領域をそれぞれ C 領域、B 領域および A 領域と呼ぶことにする。

$d \leq 2 \text{ cm}$ では、第 1 コロナ発生後フラッシュオーバーまでの時間 t_f は図 3 (a) に示すようになる。すなわち、 d を 1.0 cm から 1.3 cm まで増すと t_f は 0.3 μs 程度から 5 μs 程度まで増加する。しかし $d = 1.4 \text{ cm}$ では第 1 コロナ開始後 1.5 μs 程度で第 2 パルスが発生して t_f は 1.8 μs 程度になり、 $d = 1.2 \text{ cm}$ のときよりかえって小さくなる。なお、この第 2 パルスは後述するように陽極側からの正コロナの進展に起因する。 d を 1.4 cm から増すと t_f は増加し、1.65 cm では第 2 パルス発生後短時間でフラッシュオーバーする場合および第 2 パルスは発生せず t_f が 50~130 μs 程度の場合と 360 μs 程度の場合とがある。上記の第 2 グループの値は $d \leq 1.2 \text{ cm}$ における t_f - d 曲線の延長上にあると見なせる。 d を更に増すと t_f は上記第 3 のグループの値だけになり、 d が 2 cm のときの 700 μs 程

図 2 V_c , V_o , V_f と d との関係

Fig. 2. First corona inception voltage V_c , pulseless corona inception voltage V_o and flashover voltage V_f vs gap length d .

図3 t_f , t_f' と d との関係

Fig. 3. Time required for flashover t_f after the 1st corona start and t_f' after the final corona start vs gap length.

度まで d の増加とともに増す。このように d の値によって t_f - d 特性が異なるので、 $d < 1.65$ cm を C_{11} 領域、 $1.65 \leq d \leq 2.0$ cm を C_{13} 領域、 $1.3 \leq d \leq 1.65$ cm を C_{12} 領域とする。すなわち、この場合は C_{11} 領域中に C_{12} 領域が介在する。なお $\phi \leq 0.5$ cm の場合は C_{12} 領域は認められなかった。

C 領域でも $d > 2$ cm では後続負コロナが進展し、その発生回数が d の増加とともに増し、発生時刻は大きく変動し、 t_f は更に大幅に変動するので、 t_f の測定はほとんど無意味になる。そこでこの領域では、フラッシュオーバーとその直前の負コロナ（以下最終コロナと呼ぶ）の発生との時間間隔 t_f' を測定した。その結果、図3(b)に示すように、 t_f' は d が 2.0 cm のときの 700μ s 程度から 2.6 cm のときの $1,000 \mu$ s 程度まで、 d の増加とともに増し、この範囲における t_f' - d 曲線は C_{13} 領域における t_f - d 曲線〔図3(a)〕の延長上にあるとみなせる。しかし $d > 2.8$ cm では

t_f' は 200μ s 程度以下の値だけになる。このように、 C 領域で後続負コロナが進展してフラッシュオーバーする領域には t_f' - d 特性が異なる二つの領域があるので、これらをそれぞれ C_{21} 領域および C_{22} 領域とする〔図3(b)〕。

d が 3.8 cm 以上になると B 領域に入り、 t_f' は 10μ s 程度以下の値のグループだけになる。

A 領域 ($d \geq 5.5$ cm) になると、 t_f' は B 領域と同様に 10μ s 程度以下の場合が多い。但し d が A 領域における下限値付近では無パルスコロナから直接フラッシュオーバーする場合があります、このときの t_f' の測定は無意味である。また、短時間定在する過渡的な無パルスコロナからフラッシュオーバーし、 $10^4 \mu$ s 程度あるいはそれ以上の値の t_f' が測定される場合もあるが、図3(b)にはこのような場合の t_f' の値は示していない。

〈3・2〉 負コロナの形態 A 領域において肉眼で観測される負コロナは、印加電圧 V が V_c 程度のときはグローコロナであるが、 V を上昇するとストリーマコロナになる。従ってパルス性の負コロナには2種類の形態があることになる。

図4は d が 3 cm のとき (C_{22} 領域) の観測例で、同図(a)は第1コロナの進展直前から第5コロナの進展までの間の流し写真、(b)は第5コロナから第8コロナまでを含む静止写真である。これらからわかるように、第1コロナは回転円体状のグローコロナであるが、 V が不変であるにもかかわらず、後続コロナは後に進展するものほど径が細く、進展距離が長くなり、第3以降のコロナはストリーマ状になる〔図4(a)〕。また各コロナの幹部は同一経路をとる〔図4(b)〕。これに伴って電流パルスの波高値は第1コロナの 7 mA 程度から第5コロナの 20~25 mA 程度まで増加し、最終コロナでは 25~50 mA 程度になる。なお、第1コロナ進展後第5コロナまで連続的に進展したものと仮定したときの進展速度は 2×10^3 cm/s 程

図4 負コロナの進展

Fig. 4. Image converter photos of negative corona.

度であった。

A 領域では、 $V=V_0$ のときのコロナは発生時間間隔が極めて長く、後続コロナもグロー状コロナである。これは休止時間中に先行コロナの空間電荷が十分に減少するためと考えられる。 V を上昇すると、コロナの発生間隔が短くなり、棒電極先端表面におけるそれらの発生起点が周縁部に移動し、多くの起点からコロナが発生進展するようになる。同一起点からも、 C_{22} 領域におけると同様にコロナが間欠的に発生し、同一幹部を経て進展する。 $V=V_0$ で棒電極先端の中心付近から無パルスコロナが発生し定在するようになると、その空間電荷効果によって周縁部からのコロナの発生が抑制される。更に V を上昇すると、 $V < V_0$ のときよりも電極表面の更に周縁部からコロナが進展して無パルスコロナの定在を阻止する。しかし短時間定在する過渡的な無パルスコロナは発生し、 V が V_f に近いときは、棒電極先端中央部からストリーマコロナとは異なる細く滑らかな形状のチャンネルが進展することがある。これは上記の過渡的な無パルスコロナの幹部が進展したものである。

〈3・3〉フラッシュオーバー過程 $t_f, t_f'-d$ 特性はフラッシュオーバー過程と密接な関係があると考えられる。本節では、前述の各領域におけるフラッシュオーバー過程を観測例をあげて説明する。観測写真に示した時間 t は最終コロナ（第1コロナのみのときは第1コロナ）の発生時間を $t=0$ とした。こま撮り写真各こまの露光開始と停止時間はそれぞれ t_1, t_2 とし、こま撮り写真であることの表示とした。

(1) C_{11} 領域 d が C_{11} 領域における上限値に近いときの観測例を図5(a)~(c)に示す。(a)は流し写真と ICC のモニターパルス (MP) および電流のオシログラム、(b)はこま撮り写真、(c)は PM2, PM4 出力のオシログラムである。この場合は、第1コロナは途中で急速な進展を停止するが、その負空間電荷群は弱い発光を保ちながら陽極に向かう。この発光域 (LZ) が陽極に達するとその到達点から電圧波 (PW) が進展して陰極に達しギャップは発光の弱い紡糸状のチャンネルで橋絡される〔図5(b)〕。その後 $25\mu\text{s}$ 程度でチャンネルの陽極端から収縮が始まり、この収縮部 (PL) の伸長とともに電流が増加してフラッシュオーバーする。従って PL は導電性が高いと考えられるのでこれをリーダと呼ぶことにする⁽¹³⁾。また PM2 は第1コロナの進展直前から、PM4 は LZ の陽極到達時からフラッシュオーバーまで発光を検知している〔図5(c)〕。なお、第1コロナ進展後フラッシュオーバーまでの間の電流の極小値は約 0.5mA であった。以下、上

図5 観測写真とオシログラム (C_{11} 領域)

Fig. 5. Image converter photos of prebreakdown phenomena and oscillograms (C_{11} region).

述のようなフラッシュオーバー過程を PW 過程とする。

図5(d), (e)は $d=1.3\text{cm}$ のときの観測例である。このときの第1コロナは陽極に到達して PW を進展させ、電流が増加してフラッシュオーバーする。フラッシュオーバー直前におけるリーダ PL の進展距離と d との比は $d=1.7\text{cm}$ のときよりも小さく、 d の値を更に減少するとリーダは認められなくなる。従って d が大でギャップの平均電界 V_f/d が低いほどフラッシュオーバーに要するリーダの進展距離が長くなる。

(2) C_{12} 領域 観測例を図6に示す。同図(a)は第1コロナ進展直前からフラッシュオーバーの約 $0.3\mu\text{s}$ 前までの間の流し写真と、このときの電流オシログラム、(b)は(a)にみられる第2パルス発生直前からフラッシュオーバー直前までの流し写真、(c)は第2パルス発生時の高速度の流し写真である。この場合も第1コロナがギャップ中間で進展を停止した後陽極に向かった発光域 LZ によって電圧波 PW が進展し、これが LZ の上端に達するとその点から一次正ストリーマ pps を進展させる。このときその起点から強い発光波 LW が陰極と陽極方向へ進展する。前者は pps よりも著しく低い速度で進展し、pps チャンネルの発光を強くかつ持続的にするので、これを二次正ストリーマ sps と呼ぶことにする⁽¹²⁾。また、LW は、LZ の発光を格段に強くかつ持続的にし、陽極に到達すると反転して陰極へ向かい、sps の頭部に達してその速度を高める。図6(b)にみられるように、pps の進展によって陰極近傍にも発光が持続的なチャンネルが形成される場

合があるが、これは第1コロナ進展後にこの部分に集積された負荷間電荷群中を pps が進展したためであると考えられる。このようにして、正ストリーマ起点の下部の比較的に径の大きいチャンネルと、正ストリーマによって形成されたチャンネルの発光は著しく強く、かつ持続的になり、これがギャップを橋絡してフラッシュオーバーする。pps 発生後フラッシュオーバーに至る間の電流の最低値は 40 mA 程度で、正ストリーマの進展後チャンネルの導電性が急増することがわかる。上述のフラッシュオーバー過程を PS 過程と呼ぶことにする。

(3) C_{13} 領域 d が 1.8 cm のときの観測例を図 7 に示す。同図(a)は現象の前半、(b)は後半の流し写真、(c)、(d)はそれぞれ時間的にほぼ(a)、(b)に対応するこま撮り写真である。このときの V/d は約 19 kV/cm で、第1コロナが急速な進展を停止する位置と陽極間の距離は d の増加とともに増す。第1コロナによる負空間電荷群の陽極到達時に発生する電圧波 PW は、途中で正ストリーマを進展させること

なくギャップ中間で速度を急速に減少し、陰極近傍に達する。例えば、図 7 (a) の例では、ギャップ中間から陰極までの約 0.8 cm を進展するのに 50 μ s 程度を要している。第1コロナ進展後、陰極先端に負グローと考えられる強い発光域 NG が見られ、PW の起点には陽極グローと考えられる発光域 AG が形成される。本例では AG は第1コロナ進展後 100 μ s 程度で消滅しているが、この間はギャップ全長にわたって弱い発光域が認められ、その後は陰極近傍に無パルスコロナ状の発光域のみが認められるようになる〔図 7 (b)、(d)〕。図 7 の例では、電流は第1コロナ進展後 100 μ s 程度で極小となり、350 μ s 程度で再び増加し始める。この頃から無パルスコロナ状発光域の幹部 NS が次第に伸長し、 t が 400 μ s 程度でギャップは NS とその下方の太いグロー状チャンネルによって橋絡され〔図 7 (b)、(d)〕、その後数十 μ s でフラッシュオーバーする。上述のようなフラッシュオーバー過程を NS 過程と名付ける。

(4) C_{21} 領域 図 8 (a)、(b) は d が 2.1 cm のときのこま撮り写真である。第1コロナ進展後電流はほとんど零まで減衰するが、最終コロナ進展後は 0.18 mA 程度まで減衰した後、再び増加してフラッシュオーバーし、最終コロナ発生後のフラッシュオーバー過程は明らかに前述の NS 過程である。図 8 (c) は $d = 2.8$ cm (C_{21} 領域と C_{22} 領域との境界付近) での流し写真と MP および電流のオシログラムである。この場合は最終コロナが d の 3/4 程度進展し、PW の進展後陽極グロー AG が形成されるがやがて消滅し、NS が伸長してフラッシュオーバーしている。最終コロナはストリーマコロナであるため図 8 (b) の場合よりも NS が細くなっている。最終コロナの進展距離が d の 2/3 程度以下のときは AG の形成が認められず、

図 6 観測写真とオシログラム (C_{12} 領域)

Fig. 6. Image converter photos of prebreak-down phenomena and oscillogram (C_{12} region).

図 7 観測写真とオシログラム (C_{13} 領域)

Fig. 7. Image converter photos of prebreak-down phenomena (C_{13} region).

図 8 観測写真とオシログラム (C_{21} 領域)

Fig. 8. Image converter photos of prebreak-down phenomena and oscillogram (C_{21} region).

図 9 観測写真とオシログラム (C_{22} 領域)

Fig. 9. Image converter photos of prebreak-down phenomena and oscillogram (C_{22} region).

t_f' は $1,000\mu s$ を超す。

(5) C_{22} 領域 この領域では t_f' は $200\mu s$ 程度から $1\mu s$ 以下の値まで大幅に変動する。図 9 (a) は t_f' が $220\mu s$ のときの流し写真である。この場合は陽極近傍まで進展した最終コロナによる負空間電荷群が PW を進展させ、その後正リーダ PL が進展し、一方、NS も進展してフラッシュオーバーしている。図 9 (b) は t_f' が $5.5\mu s$ のときの流し写真、(c) はこま撮り写真とその電流および MP のオシログラムである。この場合は最終コロナ進展後 PW がコロナチャネルの発光を強めながら陰極に到達し、その直後にフラッシュオーバーしている。図 9 (b) ではチャネルの下半部がリーダ化していると思われる。前述のように、負ストリーマは同一経路を繰返し進展し、しかも径が細いため、PW の進展によって容易に導電性が高められ、 t_f' が小さくなるものと考えられる。

これらの場合の最終コロナ進展後のフラッシュオーバー過程はいずれも PW 過程である。なお C_{22} 領域でも PS 過程がみられることもある。

(6) B 領域 図 10 (a) に流し写真、(b) にその電流と MP 出力のオシログラム、(c) に PM2 と PM4 の出力のオシログラムを示す。同図からわかるように、この領域におけるフラッシュオーバー過程は PW 過程である。なお、PS 過程でフラッシュオーバーする場合もあるが、これについては次項で述べる。

(7) A 領域 無パルスコロナ発生後電圧を上昇すると、無パルスコロナから直接フラッシュオーバーする場合と、再びパルスコロナが進展してフラッシュオーバーする場合がある。後の場合は最終コロナ進展後 PW, PS, NS 過程のいずれかを経てフラッシュオーバーする。このうち PW 過程を経てフラッシュオーバーする

図 10 観測写真とオシログラム (B 領域)

Fig. 10. Image converter photos of prebreak-down phenomena and oscillograms (B region).

図 11 観測写真とオシログラム (A 領域)

Fig. 11. Image converter photos of prebreak-down phenomena and oscillograms (A region).

ときの状況は B 領域におけるそれと同じである。PS 過程を経てフラッシュオーバーしたときの $t=2.4\mu s$ からフラッシュオーバー直前までの間の流し写真とその PM2, PM4 出力を図 11 (a) に示す。これらの観測例からわかるように、最終コロナ進展後のフラッシュオーバー過程は C_{12} 領域におけると同様に PS 過程である。但し d が大であるため後続の pps が間欠的に発生進展し、sps も進展してギャップを橋絡し、フラッシュオーバーする。この間正ストリーマの起点に形成されたリーダも伸長してフラッシュオーバーに寄与していると考えられる。 C_{22} 領域、 B 領域でも PS 過程を経てフラッシュオーバーする場合があるが、 d が小なるほど正ストリーマの発生回数が少なくなる。図 11 (b), (c) は NS 過程でフラッシュオーバーしたときの観測例で、(b) は流

し写真, (c)はこま撮り写真およびそのときの PM 4 の出力と電流のオシログラムである。同図から最終コロナ進展後その幹部 NS が持続的な発光を保ち、これが次第に進展してギャップの半ば程度に達すると、NS と陽極間にやや径の大きいチャンネルの発光と陽極グローが観測されるようになり、その直後にフラッシュオーバーする。このときの t_f' は $2,000 \mu s$ 以上にもなり極めて大きい。(c)にみられる電流パルスは NS の起点とは別の個所から進展したコロナによるものである。また、無パルスコロナから直接フラッシュオーバーする場合は、その幹部が次第に伸長し、上述と同様な状況を示す。

(3.4) 放電特性とフラッシュオーバー過程 フラッシュオーバー過程には図 12 に示すように次の 3 種類の過程があることがわかった。すなわち、

上: 流し撮り様式 下: こま撮り様式
FC: 第一あるいは最終コロナ

図 12 フラッシュオーバー過程の想定図

Fig. 12. Conceptual figures of flashover processes.

表 1 領域とフラッシュオーバー過程

Table 1. Flashover processes in each of seven regions.

V	$V_c = V_f$					$V_c < V_f < V_g$	$V_c < V_g < V_f$
領域	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{21}	C_{22}	B	A
過程	PW	PS	NS	NS	※PW PS	※PW PS	PW ※PS NS
最終 コロナ	グローコロナ				→	ストリーマコロナ	

(a) PW 過程 負コロナあるいはその負空間電荷群の陽極到達点から進展した PW によってギャップを橋絡するチャンネルが形成され、その導電性が増してフラッシュオーバーする。この間にリーダが進展する場合はまず正リーダが進展する。

(b) PS 過程 PW が進展途中で正ストリーマを進展させ、これによってフラッシュオーバーが起こる。 d の値が大なるときは後続の正ストリーマの間欠的な発生回数が増す。

(c) NS 過程 負コロナの幹部 NS が 2×10^3 cm/s 程度の低い速度で伸長し、ギャップを橋絡してフラッシュオーバーする。

t_f , $t_f'-d$ 特性とフラッシュオーバー過程との間には密接な関係があり、 t_f , $t_f'-d$ 特性から分類した 7 つの領域におけるフラッシュオーバー過程は表 1 に示すようになる。すなわち、

① C_{11} , C_{12} および C_{13} 領域ではそれぞれ PW, PS および NS 過程を経てフラッシュオーバーする。

② C_{21} 領域では最終コロナ進展後 NS 過程を経てフラッシュオーバーする。

③ C_{22} 領域では最終コロナ進展後 PW 過程を経てフラッシュオーバーすることが多いが PS 過程もみられる。

④ B 領域では PW 過程あるいは PS 過程を経てフラッシュオーバーする。

⑤ A 領域では PW, PS, NS のいずれの過程もみられるが、PS 過程が最も頻度が高い。

また無パルスコロナの幹部が低速度で伸長し、NS 過程と同様の過程を経てフラッシュオーバーすることもある。図 3 の各領域における t_f , $t_f'-d$ 曲線に付記した (PW) などの記号はそれぞれのフラッシュオーバー過程を示している。従って、これら各領域の境界付近を除けば 100% それぞれに示した過程を経てフラッシュオーバーする。また、境界付近では隣接両領域の過程が混在する。なお表 1 の※印は最も頻度が高い過程を示す。

ところで図 2 で A 領域における V_g-d 曲線を d の値の小さい方へ延長すると、 d が 2 cm 程度で C 領域の V_f-d 曲線と接近する。過渡的な無パルスコロナは V_g より若干低い電圧で出現し始めるとを考慮すると、 C_{13} , C_{21} 領域では NS 過程を経てフラッシュオーバー

するが、 C_{22} 、 B 領域で NS 過程がみられないことが説明できる。すなわち C_{22} 領域では NS 過程でのフラッシュオーバーの条件が満たされないため、更に後続のコロナが進展して陽極あるいはその近傍に達し、PW あるいは PS 過程を経てフラッシュオーバーすると考えられる。また d の値が大きくなると、負コロナの陽極近傍到達には V_c より高い電圧が必要になり、 B 領域に入る。 B 領域で d が増すと V_f が上昇し、その値が V_0 程度になると無パルスコロナが出現して A 領域に入る。従って A 領域では 3 種類の過程のいずれも見られるが、 d の値が大なるほど負コロナの陽極到達が困難になって PW 過程の発生頻度は減少する。例えば C_{22} 領域では PW 過程の発生確率は 80% 程度であるが、 d が 6 cm (A 領域) では 5% 程度に低下する。なお、上に述べたような理由から B 領域は $V_c < V_f < V_0$ なる領域と考えてよい。実際 B 領域で紫外線照射を止めて急速に電圧を上昇すると照射時の V_f より高い電圧で無パルスコロナが出現し、フラッシュオーバー電圧が異常に高くなることがある。

上述の各過程に対応して PM2~PM4 の出力波形は特徴的な相互関係を示す。例えば、図 5(c)、図 10(c) [PW 過程]、図 11(a) [PS 過程]、図 11(c) [NS 過程] などである。従って、3 個の光電子増倍管の出力と電流のオシログラムからフラッシュオーバー過程を特定できる。

〈3・5〉インパルス印加時との比較 雷インパルス印加時には後続のコロナが先行コロナの頭部から発生するステップ状の進展がみられる。これは印加電圧波頭における電圧の急峻な上昇による⁽⁷⁾。従って電圧の変化が極めて緩やかな直流印加時にはこのような現象はみられない。前述〈3・2〉節の直流印加時のステップ状進展では各コロナは陰極から進展し、発生時間間隔は 100 μ s 以上であり、後続コロナは正負空間電荷のドリフトによる陰極近傍の電界の回復によって発生すると考えられる。

また、雷インパルス印加時には直流印加時の PW および PS 過程がみられるが、フラッシュオーバーまでに長時間を要する NS 過程はみられない⁽⁷⁾。

4. ま と め

本研究では、負棒-平板ギャップの直流フラッシュオーバー過程を観測検討した結果を述べた。コロナ開始電圧、無パルスコロナ出現電圧、フラッシュオーバー電圧を V_c 、 V_0 、 V_f とし $V_c = V_f$ 、 $V_c < V_f < V_0$ 、 $V_c < V_0 < V_f$ なる領域をそれぞれ C 、 B 、 A 領域とした。結果を要約すると以下ようになる。

(1) 負コロナとしては第 1 コロナの進展だけでフラッシュオーバーする領域では、第 1 コロナ進展後フラッシュオーバーまでの時間とギャップの長さ d との関係が C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} の三つの領域で互いに異なる。

(2) C 領域で後続負コロナの進展後にフラッシュオーバーする領域では、最終コロナ進展後フラッシュオーバーまでの時間と d との関係が C_{21} 領域と C_{22} 領域とで異なる。

(3) $d > 1.3$ cm では、第 1 コロナは回転だ円体状のグローコロナである。しかし C_{21} 、 C_{22} 領域における後続の負コロナは後に発生するものほど径が細く、進展距離が長くなり、第 3 あるいは第 4 コロナ以降はストリーマコロナになる。ストリーマコロナの幹部はいずれも先行コロナと同一経路をとる。

(4) A 領域では、 $V = V_c$ のときのコロナの発生時間間隔は極めて長く、後続コロナもグローコロナである。しかし V を上昇すると、前項と同様にストリーマコロナが進展するようになり、それらの起点は棒電極先端の周縁部に広がる。各起点からは間欠的にコロナが発生し、幹部は同一経路を進展する。

(5) フラッシュオーバー過程には 3 種類がある。これらをそれぞれ PW、PS および NS 過程とし、各過程を明らかにするとともに、これらの過程と前記 7 つの領域との関係を明らかにした。またこれらの過程は 2~3 個の光電子増倍管を用いることによって特定できる。

以上、従来ほとんど明らかでなかった負棒-平板ギャップの直流フラッシュオーバー過程を系統的に明らかにした。本研究は自然の気象条件のもとで実施したが、実験中の湿度の変動幅は相対湿度が 50~60% で比較的に小であった。もし湿度が大幅に変化すれば放電特性も変化することが推測される。しかしその場合も放電特性を明らかにすれば、本研究の結果からフラッシュオーバー過程の特定は容易であると考えられる。湿度の及ぼす影響については、更にその詳細を検討中である⁽¹³⁾。本論文では ϕ が大なる場合の代表例として $\phi = 2$ cm について述べた。 ϕ の値が小さい場合についても後日報告する予定である。終わりに、本研究の遂行に御協力いただいた卒論生の諸氏に心から感謝します。

(昭和 62 年 8 月 31 日受付、同年 12 月 7 日再受付)

文 献

- (1) L. B. Loeb: Electrical Coronas (1965) Univ. of California Press
- (2) 生田・牛田・石黒: 電学誌 90, 1816 (昭 45)
- (3) 細川・三好: 電学論 A 93, 420 (昭 48)
- (4) 相原・高橋: 同上 103, 349 (昭 58)
- (5) 細川・三好: 同上 96, 365 (昭 51)
- (6) 常安: 同上 96, 63 (昭 51)
- (7) 常安・嶋崎・赤崎: 同上 98, 373 (昭 53)
- (8) 常安・赤崎: 同上 93, 487 (昭 48)
- (9) 鈴木・三宅・原: 放電研究 No. 79 (昭 55)
- (10) 近藤・梶田・三好: 電学論 A 95, 17 (昭 50)
- (11) 関谷・細川・長谷部: 同上 107, 312 (昭 62)
- (12) G. G. Hudson & L. B. Loeb: Phys. Rev. 123, 29 (1961)
- (13) 江島・生澤・常安・西嶋: 昭 62 電気関係学会九州支部連大会 No. 412