棒対平板ギャップの単極性イオン流場 における相似則

正員 原 雅 則 (九州大)
 正員 金子 正 光 (九州大)
 正員 末 広 純 也 (新日本製鉄)
 准員 中 村 裕 二 (九州大)
 正員 赤 崎 正 則 (九州大)

1. ま え が き

今日、直流コロナ放電は、電気集じん装置や静電プリンタなどのイオン源として広く有効に利用されているが、一方、直流送電線下のイオン流帯電現象におけるイオン源のような障害発生の原因にもなっている。近年、コロナ放電応用機器の発達ならびに直流送電線に対する関心が増すにつれて、コロナ放電によって形成されるイオン流場の特性説明とその制御法を見出すことが要求されている。

放電空間をイオン流場制御の立場から見た場合、電離・励起現象が活発に生じてイオン供給源となっているアクティブ領域と、ここで生成されたイオンがドリフトして、いわゆるイオン流場を形成しているパッシブ領域に分けることができる。タウンゼント放電のアクティブ領域では、「同一印加電圧のもとで、放電ギャップの寸法を a 倍とし、気体圧力を $1/a$ 倍にすると、放電電流はほぼ一定に保たれる」という相似則が平行平板ギャップ系で成り立つことが知られており、パッシェンの法則が成立する。しかし、空間電荷が安

定に形成されやすい 1 気圧程度に高い気圧の気中不平等電界ギャップのアクティブ領域における放電現象に関して、どのような相似則が成立するかは十分に説明されていない。

一方、パッシブ領域であるイオン流場の特性は、ポアソンの式と電流連続の式を解くことによって原理的には求められるが、コロナ放電領域（アクティブ領域）を含めたイオン流場に対する境界条件の不明確さのために、数値計算を行う場合にも実験データをかなり取り込まなければならない。

以上のように、コロナ放電のイオン源としての定式化の不十分さと、イオン流場に対する境界条件の不明確さのために、イオン流場の特性説明は十分とは言えず、従って、イオン流場の制御も経験によるところが多い。

本研究では、直流単極性イオン流場の電界および電流密度が、印加電圧、電極寸法、気体密度とどのような関係にあるかに関して一連の実験を行い、特に電極寸法に関しては数 cm から数 m の範囲で実験を行い、拡張相似則が成立するための条件とその拡張相似則を見出した。これらの結果は、常温で得られたイオン流場の情報を高温領域に適用する場合、短間げき電気集じん装置と長間げき集じん装置内のイオン流場の状態推定および比較、ならびに模擬直流送電線で得られた地上電界および地上電流密度に関する情報を実規模送電線に適用、拡張する場合などの基礎を与えるものと考えられる。なお、本論文で言う拡張相似則とは印加電圧一定のもとで、ギャップ寸法や気体圧力などの放電条件を変えた場合、それらの放電において放電パラメータが不変に保たれることを言う。

The Similarity Relationship in Unipolar Ion Flow Fields with Rod-to-Plane Gaps. By Masanori Hara, Member, Tadamis Kameko, Member (Faculty of Engineering, Kyushu University), Junya Suehiro, Member (Nippon Steel Co.), Yuji Nakamura, Associate (Faculty of Engineering, Kyushu University) & Masanori Akazaki, Member (Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University)

原 雅則：正員，九州大学工学部電気工学科

金子正光：正員，九州大学工学部電気工学科

末広純也：正員，新日本製鉄株式会社（研究は，九州大学大学院工学研究科修士課程在学中に行った）

中村裕二：准員，九州大学大学院工学研究科修士課程

赤崎正則：正員，九州大学総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

2. 理論から予測される拡張相似則

〈2・1〉 拡張相似則とその成立条件 第1章でも触れたように、単極性イオン流場内の電界と電流密度は、(1)、(2)式のポアソンの式と電流連続の式を適当な境界条件下で解くことによって求められる。

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = q/\epsilon_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\mathbf{J} = kq\mathbf{E}/P \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $\mathbf{E}$ ：電界、 $\mathbf{J}$ ：電流密度、 q ：電荷密度、 P ：気体圧力、 k ： $P=1$ Torr におけるイオンの移動度

本章では、イオン流場の計算にしばしば使用される Deutsch の仮定を用いた Sarma らのモデル⁽¹⁾を使ってイオン流場で成立する拡張相似則とその成立条件を調べる。よく知られているように、Sarma らは次の5つの仮定を置いて直流送電線近傍の E , J , q を求める2次元問題を、電気力線に沿った一次元問題に簡略化した。

(1)～(3)式を簡略化するための仮定：

(1) 考えている領域内のイオン移動度は一定である。

(2) イオンは電界によってのみ駆動され、イオン拡散は無視できる。

(3) コロナ放電電極表面のアクティブ領域の厚さは無視できる。

(4) コロナ放電発生中の放電電極上の電界強度は、コロナ開始電界 E_c に保持される。

(5) 空間電荷は、電界の大きさのみに影響し、電界方向を乱さない (Deutsch の仮定)。

すなわち、(5)の仮定より次式が成立する。

$$\mathbf{E} = m\mathbf{E}' \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $\mathbf{E}'$ ：空間電荷が存在しないとした場合の電界、 m ：スカラー量

また、(1)～(4)項の仮定より、 q , m に対する次式を得る。

$$\frac{1}{q^2} = \frac{1}{q_e^2} + \frac{2}{\epsilon_0 q_e m_e} \int_0^x \frac{dx}{E'} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$m = m_e + \frac{1}{\epsilon_0} \int_0^x \frac{q dx}{E'} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、添字 e ：放電電極上の値、 x ：放電電極を出発して電気力線に沿った、いま考えている点までの距離

上式で、 m_e , q_e が与えられれば、 m , q が決まり、ギャップ中の電界 ($=mE'$) と電流密度 ($=kmqE'$) が求

まる。

仮定(4)より、 m_e は

$$m_e = E_c/E = V_c/V \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 V ：印加電圧、 V_c ：コロナ開始電圧で与えられ、 m は電位と電界の関係より次式を満たさなければならない。

$$\int_c E dx = \int_c m E' dx = V \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 c ：放電電極から相手電極までの電気力線に沿った曲線

従って、 q_e を仮定して、(5)(6)(8)式を満たす q , m を定めることができ、このときの E , q , J の値が(1)～(5)の仮定のもとでの(1)～(3)式の解となる。

ここで、 E , E' , q , x をギャップ長 d を使って次のように変換することを考える。

$$E_n' = E' d \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$E_n = m E_n' = m E' d = E d \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$q_n = q d^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$x_n = x/d \quad \dots\dots\dots (12)$$

このような変換を行った新しい値を使って(5)、(6)、(8)式を書き変えると次のようになる。この場合、第3、4章で述べる実験条件を想定して、棒対平板電極系の回転対称軸上でこれらの式の変換を行う。

$$\frac{1}{q_n^2} = \frac{1}{q_e^2} + \frac{2}{\epsilon_0 m_0 q_n e} \int_0^{x_n} \frac{dx_n}{E_n'} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$m = m_e + \frac{1}{\epsilon_0} \int_0^{x_n} \frac{q_n dx_n}{E_n'} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\int_0^1 E_n dx_n = \int_0^1 m E_n' dx_n = V \quad \dots\dots\dots (15)$$

すなわち、(9)～(12)式の変換を行うと、(5)、(6)、(8)式と(13)～(15)式はまったく同じ形になる。

ところで、(9)～(12)式を解く場合、 m_e は(7)式で与えた。従って、(13)～(15)式が d の値に無関係な m , q の値、すなわち、ギャップ長に無関係な電界分布とイオン密度分布を与える (E , q に関して拡張相似則が成立する) ためには、 x_n に沿った E_n' の値と m_e が d に無関係でなければならない。換言すれば、 E_n , q_n に関して拡張相似則が成り立つためには、二つのギャップ間で次の拡張相似則成立条件が満たされなければならない。

(1) 電極形状が相似である。

(2) コロナ開始電圧が等しい。

次に、電流密度 J とコロナ電流 I を(10)、(11)式の規格化した値で表現すると、

$$J = kEq/P = kE_n q_n / Pd^3 = J_n / d^3 \quad \dots\dots (16)$$

$$I = \iint J dy^2 = \iint \frac{J_n}{d} dy_n^2 = \frac{I_n}{d} \quad \dots\dots (17)$$

$$\text{ただし, } J_n = kE_n q_n / P, \quad I_n = \iint J_n dy_n^2$$

となる。 E_n , q_n の拡張相似則成立条件では, (16), (17)式より $PJ_n (=PJd^3)$ および $I_n/d (=I)$ が不変量となる。すなわち, PJ_n および I に関して拡張相似則が成立することになる。

〈2・2〉 実際の電極系で拡張相似則の成立する可能性 実際の電極系で, 前述の拡張相似則成立条件を満たすことができるだろうか。次に, 棒対平板電極を例に取ってこのことについて考えてみよう。筆者らのこれまでの経験から次の二つの可能性が見い出された。

一つは, 電極の形状を相似に保って寸法を a 倍とし, 気体の密度を $1/a$ にする場合である。この場合, 明らかに拡張相似則成立条件の第1項目は満たされる。ところで, 一般にコロナ開始電界は

$$E_c = A\delta(1 + B/\sqrt{r\delta}) \quad \dots\dots (18)$$

ただし, A, B : 定数, δ : 気体の密度, r : 棒電極先端の曲率半径

で与えられる。電極寸法を a 倍として気体密度 $1/a$ 倍とした場合, $r\delta$ は不変であるから, この電極系のコロナ開始電界は $1/a$ 倍となる。従って, 相似な形状の二つのコロナ開始電圧も同じになり, 拡張相似則成立条件の第2項目も満たされることになる。

もう一つは, 気体密度を一定として, ギャップ長のみを変化させる場合である。このとき, 明らかに拡張相似則成立条件は, 二つとも厳密には満たされない。しかし, 放電研究者の多くがこれまでに経験していることは, 棒対平板電極で, 棒の半径がギャップ長に比べて著しく小さい場合, コロナ開始電圧はギャップ長の増加と共に飽和の傾向を示す点である。換言すれば, 細い棒対平板の長ギャップにおいて, コロナ開始電圧はギャップ長にはほとんど無関係になり, 拡張相似則成立条件の第2項目が近似的に満たされる。また, 棒電極近傍を除けば, 電界分布もほぼ等しくなり, 拡張相似則成立条件の第1項目も近似的に満たされると考えられる。

3. 実験の装置と方法

第2章の検討結果に基づいて, 電極の形を相似に保って寸法を変えると共に圧力を変える実験 (以下, 小規模実験という) と, 大気圧空气中でギャップ長のみを変える実験 (以下, 大規模実験という) の2通りの

(a) 実験装置

(b) プローブ付平板電極

図1 小規模実験装置

Fig. 1. Small scale experimental setup.

実験を行った。また, 実験では, イオン流場の拡張相似則を棒対平板電極系の平板電極中央で検定した。

〈3・1〉 小規模実験 図1は小規模実験装置の概略図で, 棒対平板電極系 (ギャップ長 $d=2\sim4$ cm) をパイレックスガラス容器 (35 cm ϕ ×40 cm 長) 内にセットし, 常温の空気圧 (P) を 200~760 Torr の範囲で変化させて実験した。

棒電極は先端が半球状で, 半径 (r) を 0.1~1 cm の範囲で変化させた。平板電極は, 有効直径が 22 cm で中央にプローブ電極の中心からプローブ電極と平板電極のギャップ中心までの距離が 0.238 cm の有効半径 (r_m) を持つ電界測定用プローブ (イオン流制御型電界計⁽²⁾または Tassicker プローブ⁽³⁾と呼ぶ) を設けた。特に, 本研究では, プローブ電流を正確に測定するために, プローブは振動容量形エレクトロメータを通して接地し, まわりの平板電極にバイアス電圧を印加した。

Tassicker プローブによる測定で, 電界 E と電流密度 J は次式より求めることができる。

$$E = C_0 V_b / \pi r_m^2 \epsilon_0 (I_p / I_0 - 1) \quad \dots\dots (19)$$

$$J = I_0 / \pi r_m^2 \quad \dots\dots (20)$$

ただし, I_p : バイアス時のプローブ電流, I_0 : 零バイアス時のプローブ電流, r_m : 零バイアス時のプローブの有効半径 [図1(b)参照],

C_0 : プローブ表面と周囲電極との間の静電容量, ϵ_0 : 真空中の誘電率

C_0 の決定法には, 電荷重畳法を用いた電界の数値計算による方法⁽⁴⁾および解析的手法による方法⁽³⁾とがあり, これらの詳細は Selim 氏らによって詳細に検討されている⁽⁴⁾。筆者らも両方法で検討し, $C_0=0.13$ pF の値を採用して E, J を求めた。

予備実験によれば, 棒電極を負極性にした場合, 負グローコロナならびにトリチェルパルスコロナいずれの場合も, 棒電極先端に小さい房状コロナが1~2個形成され, この房の形成される位置が変化すると平板上の E, J の値が大きく変化した。これに対して, 正棒電極の場合は, 棒先端に膜状のいわゆるヘルムスタイングローコロナが形成され, E, J の測定値が非常に安定していた。負コロナの場合, イオン源が房状コロナに集中され, 房状コロナの移動はイオン源の移動となるために, E, J の変化があったものと考えられ

る。すなわち, 負コロナの場合, 詳細にながめるとイオン流場が時間の関数となり(4)式の成立が, 困難になっていると考えられる。そこで, 小規模実験では正棒対平板電極系で実験を行った。

〈3・2〉大規模実験 図2は, 大規模実験装置の概略図で, 電極系は棒(1cm ϕ , 先端半球状)対平板(7.1 $\times$ 7.4m)で, 棒電極の半径(r)を0.5cm一定として, ギャップ長(d)は1~5mの範囲で変化させた。平板電極中央には, 有効面積 8.49×10^{-2} m² の電流プローブを設置し, 更に, 電流プローブの中央部に電界測定用の窓を設けた。電界の測定は, これまで筆者らが模擬直流送電線や実規模直流試験送電線下のイオン流場の測定に使用してきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾川口電機製 SSV II-40 型表面電位計を静電場中で校正をしたものを用いて行った。

実験は室内解放空気中(日本碍子(株)超高圧実験ホール内)で行い⁽⁷⁾, 実験中気象条件の変化は小さかったので実験データの気圧校正などは行っていない。

大規模実験の場合, 棒電極を負極性にしてもコロナ開始電圧より印加電圧をわずかに上昇すると棒電極先端部に多数の微小房状コロナが形成されて, 平板上の E, J の測定値の時間変動は小さかった。そこで, 本実験条件では, 正, 負両方の極性に対して実験を遂行した。

4. 実験の結果と検討

放電空間におけるイオン流場の E, J, q を直接に測定することは簡単でないので, 実験では第3章で述べた棒対平板電極系の平板中心における値を測定して拡張相似則を検討した。特に, 実験では, 拡張相似則を外部放電条件と結び付けて表現することを試みた。

〈4・1〉小規模実験 イオン流場の拡張相似則を外部放電条件と結び付けて論じる前に, 第2章で述べた理論で推定された放電空間における拡張相似則の成立を数値計算で確かめ, 平板上の測定値と比較した。Sarma らのモデルで電界強度 E , 電荷密度 q などの数値計算を進める場合, ギャップ中の電気力線を求めることが必要になるが, これは電荷重畳法によった。

図3は, 電極の寸法比が2(寸法を表すパラメータを L で表している), 気体圧力比が1/2の二つの電極系に対する印加電圧が20kVのときの電極系の軸に沿った電界の計算値である。また, 図中にこのときのコロナ電流の測定値を付記する。いずれの条件の場合もコロナ開始電圧は12kVであり, 正規化した電界 EL ((10)式の $E_n=Ed$ に対応する値)は放電条件が変わっても不変であり, 電界に関する拡張相似則の

図2 大規模実験装置

Fig. 2. Large scale experimental setup.

図 3 小規模実験装置における棒平板電極系のギャップ軸に沿った電界分布に関する拡張相似則

Fig. 3. Extended similarity with respect to electric field long the gap axis of rod-to-plane electrode with the small scale experimental setup.

成立していることがわかる。平板上で計算値と実験値を比較すると、これらも比較的良好に合っている。

次に、実験で得られたデータから外部放電条件を使って拡張相似則を表現してみよう。この場合、(2・1)節で述べた拡張相似則が成立する E_n, q_n, PJ_n および I が外部放電条件のどのような関数になるかを求めるには、試行錯誤によらざるを得ない。いま、小規模実験で得られた E_n, q_n, PJ_n (平板上の測定値には添字 p を付した) および I を $\sqrt{IP/d}$, $\sqrt{V(V-V_c)}/d^2$, $V(V-V_c)/d^3$ および $V(V-V_c)/Pd$ なる外部放電条件を示すパラメータの関数で整理すると図 4~図 7 のようになる。ここで、 q_p の計算値は電荷重畳法より求め、 J_p の計算値は 0°C 1 Torr における純粋空気

図 4 小規模実験による $E_p - \sqrt{IP/d}$ 特性

Fig. 4. Characteristics of E_p versus $\sqrt{IP/d}$ obtained with the small scale experimental setup.

図 5 小規模実験による $q_p - \sqrt{V(V-V_c)}/d^2$ 特性

Fig. 5. Characteristics of q_p versus $\sqrt{V(V-V_c)}/d^2$ obtained with the small experimental setup.

図 6 小規模実験による $PJ_p - V(V-V_c)/d^3$ 特性

Fig. 6. Characteristics of PJ_p versus $V(V-V_c)/d^3$ obtained with the small scale experimental setup.

図 7 小規模実験による $I - V(V-V_c)/Pd$ 特性

Fig. 7. Characteristics of I versus $V(V-V_c)/Pd$ obtained with the small scale experimental setup.

中の単価正イオンの移動度を $k_+ = 1.4 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ として(3)式を用いて求めたものである。図中の△と●印のデータは図3で示したギャップ中の E に関する拡張相似則の成立を確認したときの実験条件下における値で、いずれも一つの直線によく載っている。すなわち、

$$E_p \propto A + B\sqrt{IP/d} \quad (21)$$

$$q_p \propto \sqrt{V(V-V_c)/d^2} \quad (22)$$

$$PJ_p \propto \sqrt{V(V-V_c)/d^3} \quad (23)$$

$$I_{oc} V(V-V_c)/Pd \quad (24)$$

いま、(21)式の A, B および(22)~(24)式における比例定数を K_A, K_B, K_C とすると、実験値のそれらの式からの誤差はそれぞれ $\pm 18\%$, $\pm 8\%$, $\pm 16\%$, $\pm 18\%$, $\pm 17\%$ 以内にある。

従って、第2章で推定された拡張相似則が近似的に成立する諸量は、(10), (11), (16), (17)式と(21)~(24)式の比較より、

$$E_n \propto E_p d \propto \sqrt{IPd} \quad (25)$$

$$q_n \propto q_p d^2 \propto \sqrt{V(V-V_c)} \quad (26)$$

$$PJ_n \propto PJ_p d^3 \propto E_p q_p d^3 \propto \sqrt{IPdV(V-V_c)} \quad (27)$$

$$I_{oc} V(V-V_c)/Pd \quad (28)$$

となる。(25)~(28)式の右辺が放電条件が変化しても不変量になることは、拡張相似則が成立するための必要条件として掲げたことより直ちに言えることで、実験から導かれた結果は第2章の推論と矛盾しない。

図4~図7には、拡張相似則成立条件が若干ずれる場合の実験値も同時にプロットした。このような条件下におけるデータもギャップ長と気圧のみを考慮した(21)~(24)式の関係に近い特性となる。ただしここで小規模実験における拡張相似則が成立する r/d の範囲は、0.025~0.5である。すなわち、イオン流場の諸量は P および d 、特に d の変化に著しく影響されるものと考えられる。

(4.2) 大規模実験 大規模実験では、棒対平板電極のギャップ長のみを変化させて平板上の E, J に関する拡張相似則を調べた。大規模実験でギャップ長のみを変えても E, J に拡張相似則が成立するかも知れないという最大の根拠は、第2章で述べたようにコロナ開始電圧がギャップ長の増加に伴って飽和の傾向を示すという経験に基づいている。そこで、本研究の場合も先ずこの点を確認した。図8はコロナ開始電圧の測定結果で、ギャップ長を1mから5mに5倍変化させてもコロナ開始電圧はわずか1.4倍になるだけである。

図8 大規模実験におけるコロナ開始電圧
Fig. 8. Corona onset voltage as a function of gap length for the large scale experimental setup.

(a) 正極性

(b) 負極性

図9 大規模実験による $E_p - \sqrt{V(V-V_c)}/d$ 特性
Fig. 9. Characteristics of E_p versus $\sqrt{V(V-V_c)}/d$ obtained with the large scale experimental setup.

(a) 正極性

(b) 負極性

 図 10 大規模実験による $J_p - V(V - V_c)/d^3$ 特性

Fig. 10. Characteristics of J_p versus $V(V - V_c)/d^3$ obtained with the large scale experimental setup.

図 4, 図 6 にならって, E_p と J_p の測定値を $\sqrt{V(V - V_c)/d}$ および $V(V - V_c)/d^3$ の関数として整理した図が図 9, 10 である。予想されたように, $d = 1 \sim 5$ m の 4 つのギャップ条件に対する測定値は, 一つの直線上に載っている。ただし, ここで大規模実験における拡張相似則の成立が確かめられた r/d の範囲は 0.001~0.005 である。

同様に, I の測定値を $V(V - V_c)/d$ の関数として整理したが, 一つの直線からのずれが認められる。そこで, 試行錯誤から I を $V(V - V_c)/d^{1.38}$ の関数として整理すると図 11 のようになり, 一つの直線上に載る。すなわち, P を一定として d を変えた場合,

$$E_p \propto \sqrt{V(V - V_c)/d} \quad (29)$$

$$J_p \propto V(V - V_c)/d^3 \quad (30)$$

$$I \propto V(V - V_c)/d^{1.38} \quad (31)$$

となり, それぞれの比例定数を K_{E2}, K_{J2}, K_{I2} とすると実験値はそれぞれ正極性の場合 $\pm 5\%, \pm 6\%, \pm 8\%$, 負極性の場合 $\pm 3\%, \pm 4\%, \pm 6\%$ 以内の精度

(a) 正極性

(b) 負極性

 図 11 大規模実験による $I - (V - V_c)/d^{1.38}$ 特性

Fig. 11. Characteristics of I versus $V(V - V_c)/d^{1.38}$ obtained with the large scale experimental setup.

で(29)~(31)式と一致する。

ところで, (30)式が成立する場合, 理想的棒対平板電極系であれば(16)(17)式の関係より(31)式の右辺分母の $d^{1.38}$ は d となるべきであるが, そうなっていない。これは, ギャップ長 5 m 程度になると, イオン流分布に対する平板電極端部の効果が無視できなくなるためであろう。

大規模実験の場合, 第 2 章で述べた拡張相似則成立条件が厳密に満たされていないにもかかわらず, E, J に関してよく拡張相似則が成立するのは次のような理由によると考えられる。一つは, <4・1> 節の最後に触れたように, E, J に関する拡張相似則に影響を与える最も大きな因子がギャップ長で, この点は(29)(30)式に反映されている。次に, 拡張相似則成立条件からの放電条件のずれ(ギャップ長を変化した場合の電極形状の非相似的变化と気体圧力が不変になっていること)が互いに打ち消し合って拡張相似則を成り立たせていると考えられる。このように, 放電電極寸法を一定にしてギャップ長を変えた場合に E, J に関し

て拡張相似則が成立することを見出したことは、直流送電線において電線寸法を一定にして電線高を変えることによりイオン流場の E, J を目標とする値に納めたいときなどに有用となる。

5. 結 論

イオン流場が関与する機器ならびに設備において、実際の条件下でイオン流場を詳細に研究できる場合は比較的少ない。そこで、実験室あるいは一つの実験条件下で得られたイオン流場の情報を種々の実際に合った条件下における値に換算することがしばしば要求される。例えば、電気集じん装置中でガス温度が変化したとき、放電極と集じん極との間げきを変化させたとき、あるいは直流送電線路の電線高を変えたときなどに、地上イオン流場がどのように変化するかを知りたい場合はイオン流場の情報に関する換算が必要になる。このような問題と関連して、イオン流場の電界と電荷密度を Deutsch の仮定を置くことによって推定できる場合のイオン流場における拡張相似則の成立条件を見出した。更に、それらを棒対平板電極系の棒電極半径 (r) (0.1~1 cm) とギャップ長 (d) (2~4 cm) と気体圧力 (P) (200~760 Torr) を変化させる方法で実験的に検証した。ただし、ここで小規模実験における拡張相似則が成立する r/d の範囲は、0.025~0.5 である。その結果、次のような結論を得た。

1. イオン流場で拡張相似則が成立するためには、放電条件を変えても (1) 電界分布が変化しないこと、(2) コロナ開始電圧が変化しないこと、の二つの条件が満たされなければならない。

2. 上記の条件が満たされる場合、Deutsch の仮定が成立するイオン流場では、 $E_n \propto E_d$, $q_n \propto qd^2$, $PJ_n \propto PJ_d^3$, I がギャップ寸法ならびに気圧に無関係な値となると推定される。

3. 棒対平板の短ギャップで電極形状を拡張相似則

に保って寸法 (棒電極の半径 0.1~1 cm, ギャップ長 2~4 cm) と気体圧力 (200~760 Torr) を変えた場合、コロナの発生点がタフト状になる負棒対平板ギャップを除いて第2項の推定が最大誤差 $\pm 18\%$ の範囲であてはまることが確かめられた。

4. 棒対平板の長ギャップで、棒電極の半径を 0.5 cm 一定とし、ギャップ長を 1~5 m の範囲で変化させた場合 ($r/d = 0.001 \sim 0.005$), 第1項の条件は近似的に満たされ、 E, J に関して第2項で述べた拡張相似則が最大誤差 $\pm 8\%$ 以内で成立することが確認された。

本研究の大規模実験は、文部省科学研究費総合研究 (A) (名古屋大学工学部、堀井憲爾教授代表) により日本碍子(株)超高圧実験ホールで行い、小規模実験はその他の文部省科学研究費によった。記して関係各位に感謝致します。(昭和61年9月18日受付, 同61年12月19日再受付)

文 献

- (1) M. P. Sarma & W. Janischewskyj: "Analysis of corona losses on DC transmission lines: I-Unipolar lines", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-88, 718 (1969)
- (2) 電気学会, 放電における電界計測法調査専門委員会: 電界計測法, 電気学会技術報告 (II 部) 第219号 (昭和61年)
- (3) O. J. Tassicker: "Boundary probe for measurement of current density and electric-field strength-with special reference to ionized gases", *Proc. IEE*, 121, 213 (1974)
- (4) E. O. Selim & R. T. Waters: "Static probe for electrostatic field measurement in the presence of space charge", *IEEE Trans. IA*, IA-16, 458 (1980)
- (5) M. Hara, N. Hayashi, K. Shiotsuki & M. Akazaki: "Influence of wind and conductor potential on distributions of electric field and ion current density at ground level in dc high voltage line to plane geometry", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* Vol. PAS-101, 803 (1982)
- (6) M. Hara, T. Tsutsumi & M. Akazaki: "Studies on electric field and ion current at ground level under modelled HVDC transmissionlines", *J. Electrostatics*, 18, 163 (1986)
- (7) 原・金子・赤崎: 「イオン流場で成立する相似則」放電研究, No. 108, 26 (昭和61年)