

## ノート

# Meek の理論に基づいた球形正荷電粒子の最大電気量の推算法について

中島 耀二\*,<sup>1</sup>, 佐藤 孝\*\*,<sup>2</sup>

(1999年10月1日受付; 1999年10月26日受理)

## On the Estimation of Maximum Charge Sustainable for a Positively Charged Spherical Particle by the Meek's Theory

Yoji NAKAJIMA\*,<sup>1</sup> and Takashi SATO\*\*,<sup>2</sup>

(Received October 1, 1999; Accepted October 26, 1999)

In a previous paper<sup>1)</sup>, we have proposed a method to estimate the maximum charge sustainable for a negatively charged spherical particle in normal air. As for a positively charged particle, we have cited a reasonable calculation by Elghazaly and Castle<sup>2)</sup> who applied the semi-empirical theory by Hartmann<sup>3)</sup> to a spherical particle. Since the theory of Hartmann includes an approximate equation for the electric field around a corona electrode, we reconsider the calculation by Elghazaly et al. using the exact electric field around a sphere, but we find that the corrected result seems to be rather unreasonable. Hence we adopt for positively charged particles the Pedersen's theory<sup>4)</sup> which is based on the Meek's hypothesis<sup>5)</sup>.

### 1. はじめに

筆者らは前報<sup>1)</sup>で負に荷電した球形粒子が大気中で保持できる最大電気量の推算法を提案した。正に荷電した粒子については Elghazaly と Castle<sup>2)</sup>の推算法を紹介した。これは Hartmann<sup>3)</sup>が Meek のストリーマ理論に基づいて同心円筒電極系や針-平板電極系で作られる不平等電界中の正コロナ開始条件を半理論的に解明した研究を孤立系の帶電球に適用したものである。しかし Hartmann の理論ではコロナ電極周りの電界計算に一般化のための近似式が用いられている。筆者らは、球形粒子に対して正確な結果を得る目的にこの近似を取り除き再計算したところ、かえって不自然な結果を得た。そこでここでは Pedersen が提案した方法<sup>4)</sup>により正に荷電した球形粒子が大気中で保持できる最大電気量を試算してみる。

**キーワード:** 正荷電粒子, 最大電気量, コロナ開始, Meek の理論, ストリーマ

\*北海道大学大学院工学研究科物質工学専攻 (060-8628  
札幌市北区北13西8)

Division of Materials Science and Engineering,  
Graduate School of Engineering, Hokkaido University,  
Kitaku, Sapporo, 060-8629, Japan

\*\*北海道工業大学電気工学科 (006-8585 札幌市手稲区  
前田7条14丁目)

Department of Electrical Engineering, Hokkaido  
Institute of Technology, Maeda, Teineku, Sapporo,  
006-8585, Japan

<sup>1</sup> yoji@eng.hokudai.ac.jp

### 2. Hartmann の理論<sup>3)</sup>

図1のような不平等電界を与える電極系を考える。電極の先端からある距離  $L$  だけ離れると実効電離係数が0になる位置がある。初電子がこの位置から出発すると最長の電子なだれができる。このとき Meek の仮説<sup>5)</sup>にしたがって、なだれ電子の後に残る正イオンによって電子なだれの頭部に作られる電界強度  $E_p$  が、外部電界強度（空間電荷を無視したときの電界）の電極先端での値  $E_s$  程度に強力になれば、この電子なだれはストリーマに発達すると考える。Meek の理論ではストリーマ発生限界を  $E_p \approx E_s$  としたが、後に修正されて  $E_p = KE_s$  ( $K=0.1 \sim 0.5$ ) とするのがよいとも言われている<sup>6)</sup>。Hartmann はこの基準を

$$E_p + E_0 = E_s \quad (1)$$

で置き換えた。ここで  $E_0$  は実効電離係数  $\alpha$  が0になる電界強度で、常温、常圧の大気では 2.46MV/m である。また、

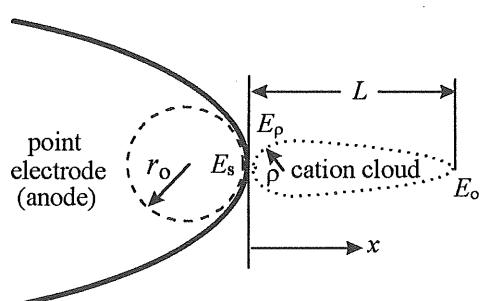


図1 陽極に向う電子なだれ

Fig.1 electron avalanche towards anode

$E_p$ については不平等電界に対して次式に修正した。

$$E_p = \frac{e}{3\pi\varepsilon} \frac{\alpha_H}{\rho} \exp(k) \quad (2)$$

$$k = \int_0^L \alpha dx \quad (3)$$

ここで  $e$  は電気素量,  $\varepsilon$  は空気の電媒定数,  $\alpha_H$  は電子なだれ頭部の外部電界強度( $=E_s$ )における実効電離係数,  $\rho$  は電子なだれ頭部の半径,  $k$  は電離積分と呼ばれるパラメタであるが, これは電界強度の変化を反映させた実効電離係数  $\alpha$  を電子なだれの経路に沿って積分した量である。

Hartmann は電極付近の電界強度に次の近似式を用いた。

$$E(x) \approx E_s r_0 / (2x + r_0) \quad (4)$$

ここで  $r_0$  は電極の先端を球面で近似したときの球の半径,  $x$  は電極先端からの距離,  $E_s$  は電極先端の電界強度である。また電子なだれの頭部の半径  $\rho$  を次式で評価した。

$$\rho = 2 \sqrt{\int_0^L \frac{D_T}{\mu_e E(x)} dx} ; \quad D_T \approx 0.012 \left( \frac{E}{p_{20}} \right)^{0.515} \quad (5)$$

電子の横拡散係数  $D_T$  と移動度  $\mu_e$  の比についての実験式の単位は  $D_T/\mu_e$  については m,  $E/p_{20}$  については V/(m kPa) である。なお  $p_{20}$ [kPa] は放電環境と同じ空気密度を 20°C の雰囲気温度で与える圧力である。

実効電離係数  $\alpha$  に対して Hartmann は種々の実測データをまとめ、空気温度の影響まで含めた実験式を用意した。(前報<sup>1)</sup>で引用した彼の論文には実験式の係数に誤記がある。) こうした準備の下で、与えられた  $r_0$  の電極に対するコロナ開始電界強度が次の手順で計算できる。

- 1) 電極表面の電界強度  $E_s$  を仮定し、(4)式から  $E(x)=E_0$  ( $=2.46\text{MV/m}$ ) となる  $x$  を求め、それを  $L$  とする。
- 2) (3), (5)式を数値積分し、(2)式から  $E_p$  を求める。
- 3) (1)式が成立するまで  $E_s$  を仮定しなおす。

Hartmann はこのようにして針状電極の正コロナ開始電界強度を求め、計算結果を Peek の経験式の形にまとめた。

### 3. 正荷電粒子の最大電気量の計算

Elghazaly ら<sup>2)</sup>は Hartmann の結果がそのまま球形粒子に応用できると考え、図 2 の点線(1)を与えた。Hartmann は彼の計算法が  $r_0 \geq 0.1\mu\text{m}$  で有効であると述べている。ところが(4)式の近似範囲は球電極では  $r_0 \gg L (\geq x)$  になること、電子なだれの長さ  $L$  は少なくとも数  $10\mu\text{m}$  になることを考えると、Hartmann が主張するほど小さな粒子に適用できるとは思えない。そこで筆者らは(4)式を球形粒子の周りの正確な電場式(6)に取り替えて再計算してみた。

$$E(x) = E_s (r_0/r)^2 = E_s \left\{ r_0 / (r_0 + x) \right\}^2 \quad (6)$$

その結果は図 2 の曲線(2)に示したように、直径  $5\mu\text{m}$  付近に最小値をもつ不自然なものになった。これは(5)式の実

験式が、換算電界強度  $E/p_{20}$  が  $170\text{kV}/(\text{m kPa})$  以下の条件で求められたものであり、直径  $300\mu\text{m}$  以下の粒子ではこの条件を満足していないことも一因であろう。

次に Pederson<sup>4)</sup>が提案した別の方法を試みる。(2)式より、

$$\int_0^L \alpha dx = \ln(3\pi\varepsilon\rho E_p/e) - \ln(\alpha_H) = G(L) - \ln(\alpha_H) \quad (7)$$

彼は上式の中辺第 1 項が、正コロナ開始限界では  $L$  だけの関数になると想え  $G(L)$  とおき、これを平等電界の Paschen 曲線と  $\alpha$  の実測値から決定した。不平等電界中でのコロナ開始電界強度は、 $E_s$  を仮定して(6)式で  $E(x)=E_0$  となる  $x$  を  $L$  とみなして(7)式の右辺を評価し、これが左辺の電離積分と等しくなるように  $E_s$  を試行錯誤して求める。図 2 の曲線(3)は、前報<sup>1)</sup>で報告した空気の Paschen 曲線と  $\alpha$  の実験式から得た  $G(L)$  を使い(7)式を満足する  $E_s$  を求め、球形粒子の電気量に換算した結果である。比較のため、前報で与えた負粒子に対する限界値も曲線(4)で示した。

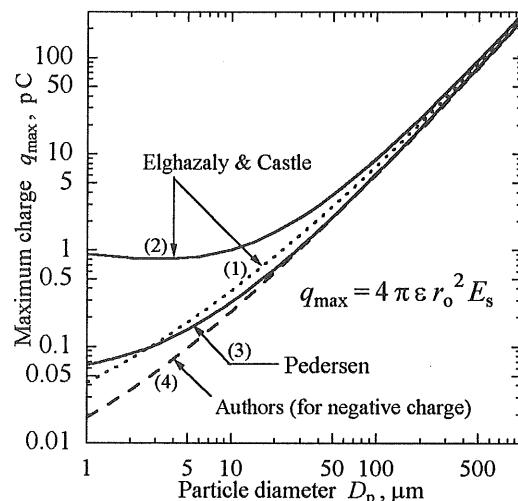


図 2 球形粒子の最大電気量の計算値

Fig.2 Calculated maximum charge for spherical particles

### 4. おわりに

正荷電粒子が大気中で保持し得る最大電気量の推算法を比較検討したところ、理論的に精密な取り扱いに見える Hartmann の結果を用いた Elghazaly らの方法より Pedersen の方法の方が妥当な結果を与えるように思える。

#### 参考文献

- 1) 中島耀二, 佐藤孝: 静電気学会誌, 23 (1999) 81
- 2) H.A.Elghazaly and G.S.P.Castle : Phys.Conf.Ser.No85: Poster Session 1, *Electrostatics '87, Oxford*, p.121, IOP Publishing, Bristol (1987)
- 3) G.Hartmann : IEEE Trans. on IA, IA-20 (1984) 1647
- 4) A.Pedersen : IEEE Trans. on PAS, PAS-86 (1967) 200
- 5) J.M.Meek : Phys.Rev., 57 (1940) 722
- 6) 武田進: 気体放電の基礎 (新訂版), p.78, 東京電気大学出版局 (1990)

## 研究室めぐり

**FUJI  
ELECTRIC**

株式会社 富士電機総合研究所  
Fuji Electric Corporate Research and Development,Ltd.

富士電機㈱は1923年の創業以来、社会、産業そして生活の広い分野にさまざまな製品システムを提供し、その使命を果たしてきました。その基本理念は「豊かさへの貢献」「創造への挑戦」「自然との調和」です。

主な事業分野は以下の通りです。

○社会インフラ事業:エネルギー・送変電・水処理・交通

○産業分野事業:PA・FA・ビル設備・情報機器/電子デバイス

○生活関連事業:自動販売機・スーパーマーケット機器・カードシステム

当研究所は1960年に富士電機㈱の中央研究所を核として分離・独立した研究開発専門会社で、組織と研究領域は以下のようになっています。

○材料技術研究所:有機・無機の機能材料開発と微視解析部門で構成。機能材料は記録デバイス材料・表示デバイス材料・高温デバイス材料を中心に開発を行っています。

○デバイス技術研究所:シリコン半導体デバイスに特化した部門で、IGBT等のパワー素子、特定用途のシステムICを中心に開発を行っています。

○環境技術研究所:上下水道処理、光応用計測、省エネルギー等に関する要素・システム技術の開発を行っています。

○電機技術研究所:富士電機㈱が従来から手がけているエネルギー・送変電機器および産業用電気機器の高効率・高精度・高機能化を中心に開発を行っています。

○プロジェクト室:プロジェクト室は機動的に開発を進めるための組織で、現在、太陽電池と静電・放電応用を取り上げています。

以上のように、当研究所では静電気単独の応用研究は少なく、静電・放電応用機器として取り扱ってきました。ここでは、事業に結びついた例としてトンネル用電気集塵機と水処理用オゾン発生装置を紹介します。

現代の日本では高速道路網が交通の重要な手段となっています。この中の長距離トンネルや交通量の多いトンネルでは、有害物質濃度抑制や視程

の確保の観点から換気システムの設置が必須となっています。電気集塵機付き縦流換気システムは車道内の煤塵を含んだ空気を集塵機室に導き、電気集塵器で煤塵を除去し、清浄化した空気を再び車道空間に戻します。

電気集塵機はワイヤ電極と平板電極間に直流高電圧を印加してコロナ放電でイオンシャワーを形成し、ここを通過する浮遊煤塵粒子を帯電、下流に設置した直流電界で加速、電極板に捕獲します(図1)。

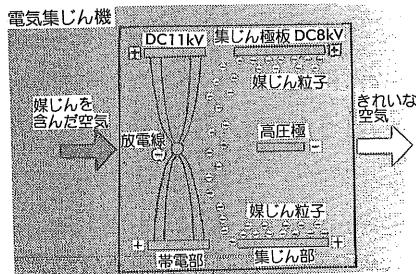


図1 電気集塵機の原理

電気集塵器の技術的課題は高効率化と低メンテナンス頻度化です。

気流解析、帯電メカニズム解析、微粒子計測技術を基に、負極性ワイヤ電極を用いた高性能品を提供しています(図2、図3)。

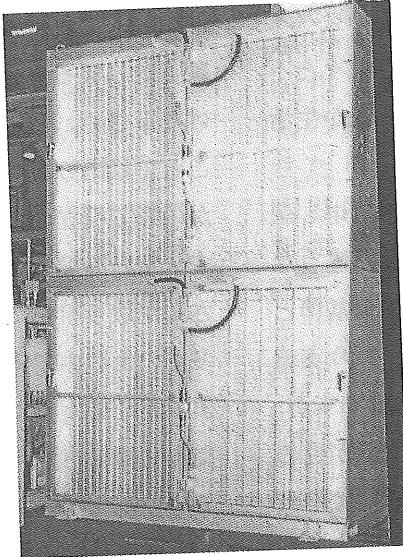


図2 電気集塵機集塵ユニット写真

水環境の悪化から上水道の高度処理や下水および排水処理は社会イン

ICPプロジェクト室  
室長 虎口信  
(とらぐちまこと)

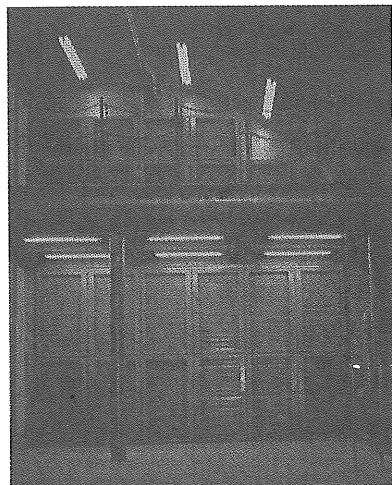


図3 電気集塵機設置状況

フラとして極めて重要です。富士電機㈱は従来から上水道関連の電機システムを提供しています。

オゾン発生装置はその主要ハードで、低コスト、高い信頼性、高濃度オゾンの実現が求められています。

オゾン生成メカニズム解明を基に円筒接地電極内面に薄肉の電気ガラスを溶着し、内部にステンレス製の円筒高電圧電極を配置して、高精度の短ギャップ化と高冷却性能を実現。高周波での無声放電と併せて、酸素原料で濃度 $200\text{g/m}^3$ までを商品化(図4)、更なる性能アップを目指しています。

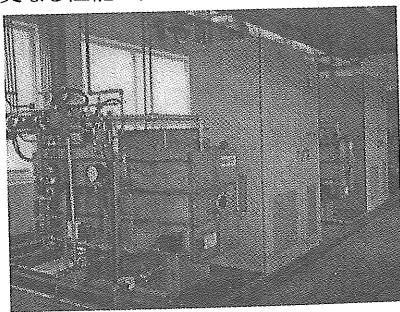


図4 オゾン発生装置設置状況

静電気は電子デバイス生産ラインのパーティクル汚染・製造プロセス装置内のゲート破壊等、負の作用が有る一方で、それ自体および放電プラズマとの複合等で極めて有用なシステムが構築できると考えます。皆様との技術交流の中から更なる発展ができるのではと楽しみにしています。