

論 文

レーザ・ドップラー速度計を使ったイオン風の研究

増田 閃一*, 阿久津 顯右*, 合原 一幸**

(1979年6月29日受理)

Study on Ionic Winds by Means of Laser Doppler Velocimeter

S. MASUDA,* K. AKUTSU* and K. AIHARA**

(Received June 29, 1979)

Ionic winds in electrostatic precipitators, which produce much effect on particle motions inside precipitators, are studied by means of laser doppler velocimeter. First, Negative Ionic Wind from the needle point in the needle to plane electrode system is investigated. (Needle electrode: discharge electrode, plane electrode: collecting electrode.) Secondly, Back Discharge Ionic Wind, which blows from the collecting electrode to the discharge one when the back discharge occurs, is researched. A mica plate with a pin hole is used as the sample layer. Lastly, under the existence of the flow parallel to the plane electrode, the electro-hydrodynamic behavior of the submicron particles near by the boundary layer of the plane electrode is examined.

1. まえがき

電気集塵装置は、ダスト粒子を荷電して静電的に除去するものであるが、粒子の集塵過程を考えるにあたっては、イオン風の影響を無視できない。イオン風とは、コロナによって発生するイオンが、電界によって対極に移動する際に、その運動エネルギーを中性分子に分かち与え、イオンおよび中性分子が移動することによって発生する風である。電気集塵装置内においては、放電電極からの負イオン風、および逆電離現象に伴う逆電離イオン風が存在しており、これらのイオン風の風速は、少なくとも数 m/s 程度である。一方、電界強度 5 kV/cm における帶電ダスト粒子の電気的移動速度は、粒径 1~10 μm の粒子で約 0.1~1.0 m/s、粒径 0.1~1.0 μm のサブミクロン粒子ではたかだか 10 cm/s 程度である¹⁾。したがって、粒径 10 μm 以下の粒子の集塵過程は、電場とともに流体場を考慮した、いわゆる EHD(electro-hydrodynamic) 過程として取り扱う必要があり、そのためイオン風の研究が重要なものとなる。

そこで今回、レーザ・ドップラー速度計を使って、イオン風の研究を行なった。はじめに、針対平板電極(針電極および平板電極は、おのの放電電極および集塵電

極に対応)における針先からの負イオン風について研究した。次に、平板上にダストの代りに穴あきマイカ板を置いて逆電離を起こし、そのときの逆電離イオン風について研究した。最後に、平板に平行方向の流れがあるときの、平板付近の境界層近傍におけるサブミクロン粒子の挙動について研究した。

2. 測定方法

レーザ・ドップラー速度計は、流体中を移動している粒子にレーザ光をあて、その散乱光のドップラーシフトを測ることによって流速を測定するものである。図1において、粒子の速度ベクトル v の入射軸に垂直な速度成分を V 、ドップラー周波数を f_d 、レーザ光の波長を λ 、ビームの交差角を θ とすれば、

$$V = \lambda f_d / 2 \sin(\theta/2) \quad (1)$$

となり、 f_d を測ることによって V が求まるわけである。

散乱粒子として、DOP(フタル酸ジオクチル)粒子を使用した。この粒子の粒径分布を測定した例を表1に示す。これを見ると大部分が粒径 1 μm 程度以下であり、したがって電気的移動速度は、イオン風速に比べて無視できる¹⁾。

実験装置の配置を図2に示す。平板電極はレーザ光の通過をさまたげないように、160° の頂角を有する屋根型とした。外気の影響をさけるため電極系は 30cm 立方のアクリル板容器のなかに収めてあり、コンプレッサ、DOP 粒子発生装置によって、DOP 粒子が針対平板電極

*, ** 東京大学工学部 (113 東京都文京区本郷 7-3-1)

Faculty of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

* 電気工学科 Department of Electrical Engineering,

** 電子工学科 Department of Electronic Engineering

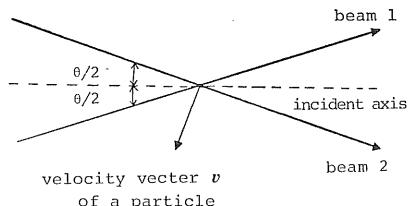


図 1 レーザ・ドップラ速度計の原理

Fig. 1 Two laser beams for doppler velocimeter.

表 1 DOP 粒子の粒径分布

Table 1 Size distribution of DOP particles used.

Particle size range (μm)	Fraction (%)
0.2~0.4	23.40
0.4~0.6	22.21
0.6~0.9	21.23
0.9~2.0	19.62
2.0~	13.55

間に供給され、プローワによって排気される。測定系は、レーザと光学素子、光電変換素子、信号処理系からなり、測定モードはフリンジモード前方散乱型と呼ばれる。座標軸は図 3 のように、Z 軸、r 軸、 r^* 軸を考える。とくに、図 3 における速度 V_{\parallel} と V_{\perp} を区別するため、周波数シフトシステムを使用した。これは、一方のビームの周波数を音響光学セル（プラグセル）を使ってシフトさせることにより、測定点に生じるフリンジが、 $V_F = \Delta f \times D_F$ で移動することを利用している。ここで、 Δf はシフト周波数（本研究では 40 MHz）、 D_F はフリンジの間隔である。また、測定領域は幅 116.0 μm 、高さ 115.4 μm 、長さ 1,138.8 μm 、体積 0.008 mm^3 の梢円体である。

なお前述のように、イオン風の測定に際しては DOP 粒子の電気的移動速度はイオン風速に比べて十分小さいので、ほぼ正確にイオン風速度を測っていることになる。しかし、実際にはあくまでもイオン風によって運ばれている帶電粒子の速度を測っているということに注意する必要があり、このことはとくに 5 章で重要となる。

3. 静止空気中の負イオン風の測定

図 3 の針電極からの負イオン風を測定した。Z 軸上の各点における、平板に垂直な方向（つまり Z 方向）の速度分布を測定したのが図 4 である。この結果より、負イオン風は平板の近傍でも 4~5 m/s 程度のかなり速い平均速度（×印で表わす）で針から平板の方向へ吹いており、またその風速は渦動のため平均値の上下にかなり大

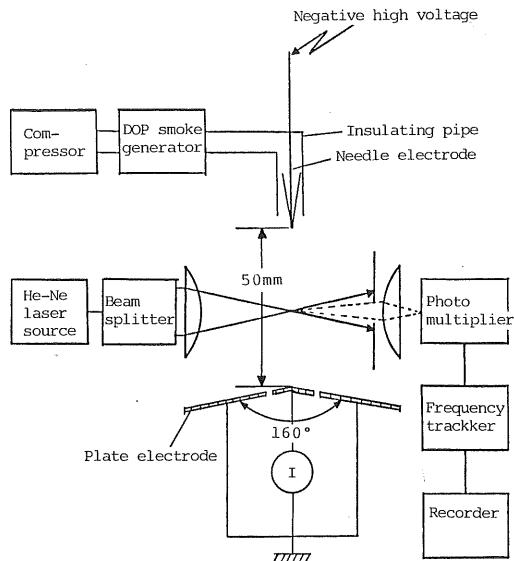


図 2 実験装置の概略

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

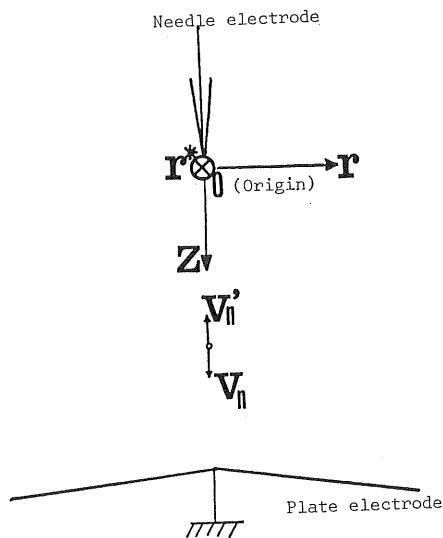


図 3 座標系

Fig. 3 Coordinate system used.

きく変動していることがわかる。

次に Z 方向の速度分布について、負イオン風と空気流を比較したのが図 5 である。縦軸は最大風速で正規化した値である。図 5 より、負イオン風の分布は $Z=10 \sim 45$ mm くらいまではほぼ一定であるが、空気流速度は $Z=30$ mm くらいから低下している。平板直前まで速度があまり低下しないのが負イオン風の特徴であり、イオン

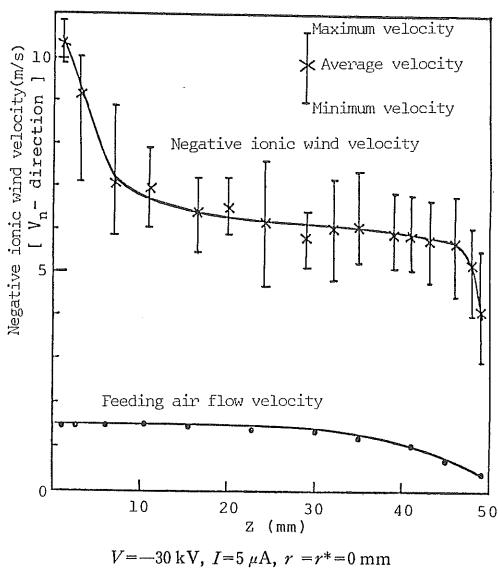


図 4 負イオン風速度の平板に垂直方向 (Z 方向) 成分の分布

Fig. 4 Distribution of negative ionic wind velocity (Z -component) along Z -axis.

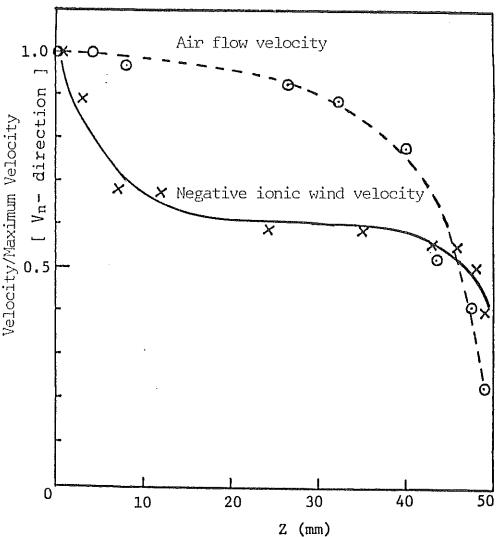


図 5 負イオン風と空気流の速度分布 (Z 成分) の比較

Fig. 5 Comparison between negative ionic wind velocity and feeding air flow velocity (Z -component).

が駆動力であることに起因していると思われる。

次に、図 2 の装置でビームを 90 度回転させることにより、 Z 軸上の各点における、平板に平行方向 (つまり r^* 方向) の負イオン風の速度分布を測定したのが図 6 である。この結果より、 r^* 方向の風速は、平板の近傍までほとんどゼロで、 $Z=47$ mm くらいから急に増加

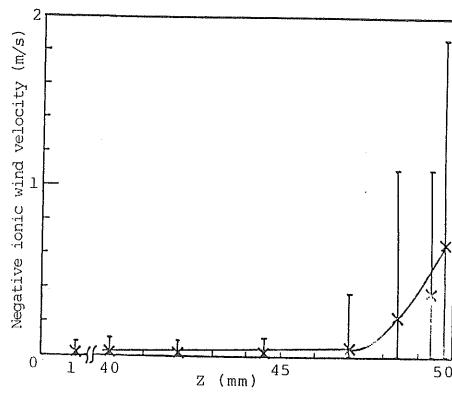


図 6 負イオン風速度の平板に平行方向 (r^* 方向) 成分の分布

Fig. 6 Distribution of negative ionic wind velocity (r^* -component) along Z -axis.

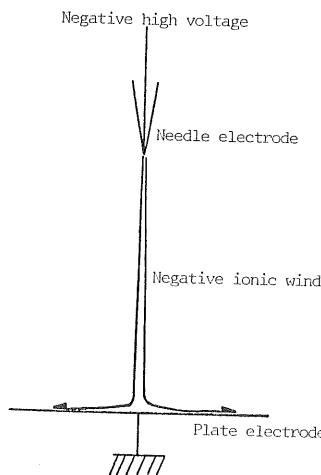


図 7 負イオン風の模式図

Fig. 7 Schematic representation of negative ionic wind.

することがわかる。図 4 および 6 を考え合わせると、針先からの負イオン風は、図 7 のようになっていると考えられる。

次に、針電極に印加する負電圧を変えて、負イオン風の電圧特性を調べたのが図 8 である。イオン風速は、電圧にはほぼ比例することが、Robinson²⁾によって示されている。実際、大部分の場合この関係が確認された。しかしながら、平板のごく近傍 (平板から 1 mm 以内)においては、負イオン風の風速は電圧の 2 乗に比例するという関係が見いだされた。この現象は平板のごく近傍でしか見られないことから、流体の境界層における特性と関係するものと思われるが、現在のところ詳細は不明である。

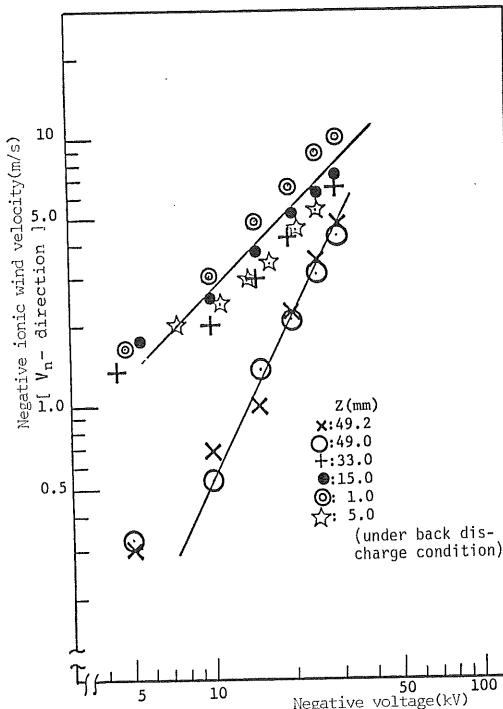


図 8 Z 軸の各点における負イオン風速度 (Z 成分) の電圧特性

Fig. 8 Voltage characteristics of negative ionic wind (Z -component).

4. 静止空気中の逆電離イオン風の測定

電気集塵装置内において、ダストの抵抗率が $5 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 程度を上回ると、集塵電極上に堆積したダスト層が絶縁破壊を起こし、逆電離現象が生じる。この逆電離に伴って、集塵電極から放電電極に向かって発生する逆電離イオン風について研究した。

逆電離を起こすために、ダスト層の代りに、直径 0.5 mm のピンホールをあけたマイカ板を平板上に置いた。マイカの抵抗率は $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ よりはるかに大きく、ふつう空間ストリーマと表面ストリーマの両方が存在するミックス・ストリーマモードの逆電離となる³⁾。

マイカ板上で、針の真下 ($r=r^*=0 \text{ mm}$, $Z=50 \text{ mm}$) の位置にピンホールを 1 個あけ、そのピンホールの真上 (つまり Z 軸上) の各点において、平板に垂直方向の逆電離イオン風の速度分布を測定したのが図 9 である。図において、ピンホールから針方向に吹く逆電離イオン風を BD で表わし、これに対して針から平板方向に吹く正常なイオン風を N で表わしてある。図 9 より、ピンホールの直前では最高 10 m/s 前後の高い速度のきわめて変動のはげしい逆電離イオン風が、平板から針の方向

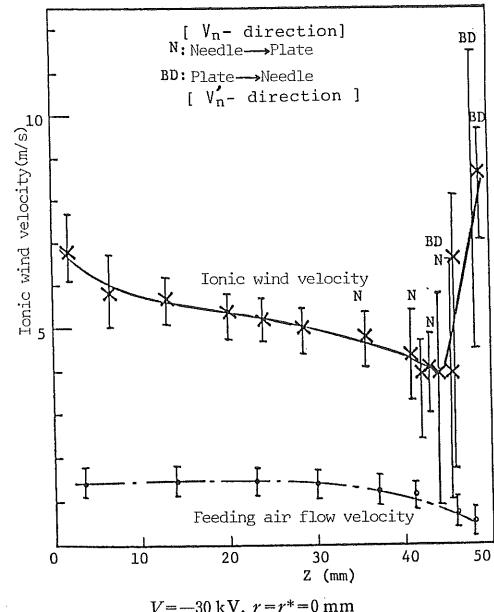


図 9 逆電離発生時の平板付近の Z 軸上のイオン風速度 (Z 成分) 分布 (1 個の穴を有するマイカ板使用)

Fig. 9 Distribution of ionic wind velocity (Z -component) along Z -axis near collecting electrode under the occurrence of back discharge (mica plate with a single pin-hole).

へ吹いていることがわかる。また、 $Z=45 \text{ mm}$ の付近で風の方向が針→平板の向きに反転する。

次に、 $r^*=0 \text{ mm}$, $Z=48.0 \text{ mm}$ の位置における r 軸方向の各点での、平板に垂直方向の速度成分を測ったのが図 10 である。同図において、各点での風速の絶対値とともに、いくつかの点における BD 方向 (図 3 の $V_{n'}$ 方向) および N 方向 (同 V_n 方向) の風速の最大値を併記した。図 10 より、強い逆電離イオン風 ($V_{n'}$ 方向) が吹くのは $r=2 \text{ mm}$ くらいまでだが、 $r=8 \text{ mm}$ の点でも逆電離イオン風が影響を与えていることがわかる。それと同時に、負イオン風 (V_n 方向) の速度成分も存在し、かなり複雑な流れになっている。

電圧 (15~20 kV), 電流 (1~10 μA) の範囲では電圧、電流の増加とともに逆電離イオン風の平板に垂直方向の速度も増加するが、電圧、電流がそれ以上になってストリーマが肉眼でも見えるようになると、風速は電圧、電流に関係なく 10 m/s 前後の値を示す。

ピンホールの数を増やしても、破壊点同士の勢力範囲が重なるようにしても同程度の逆電離イオン風が吹く。たとえば、図 11 のようにピンホールが密集した場合について、 $r^*=0 \text{ mm}$, $Z=48.5 \text{ mm}$, $r=0 \text{ mm}$ の点を中心とし r 軸方向の各点での平板に垂直方向の速度成分を調

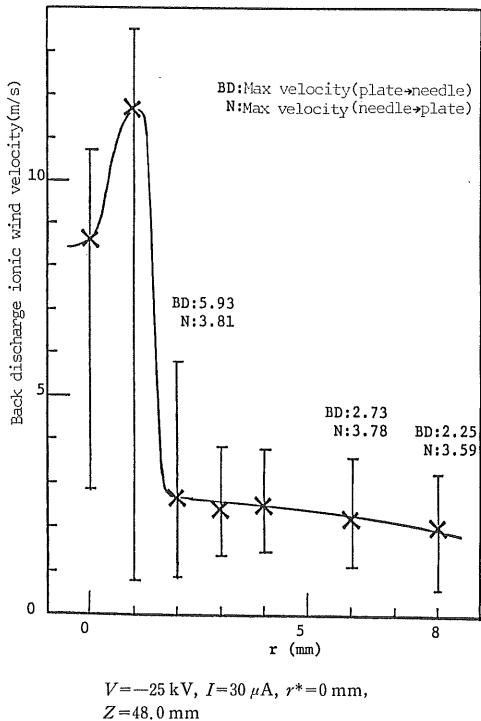


図 10 逆電離イオン風（Z成分）の r 方向の分布（1 個の穴を有するマイカ板使用）

Fig. 10 Distribution of back discharge ionic wind velocity (Z-component) along r -axis (mica plate with a single pin-hole).

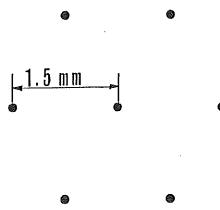


図 11 密集したピンホールの配置図

Fig. 11 Arrangement of multiple pinholes.

べたのが図 12 である。

次に 3 章と関連して、逆電離の発生に伴う針先からの負イオン風の変化について論じる。平板上に穴のあいていないマイカ板と、ピンホールが 1 個のマイカ板を置いた場合について、針に近い領域の Z 軸上の負イオン風を比較したのが図 13 である。これより、逆電離が発生しても針先からの負イオン風は電圧 25 kV において 0.5 m/s 程度しか増加しないことがわかる。また、この際の負イオン風の電圧特性を図 8 に併記した。図から明らかなことおり、このときの負イオン風もほぼ電圧に比例しているのがわかる。

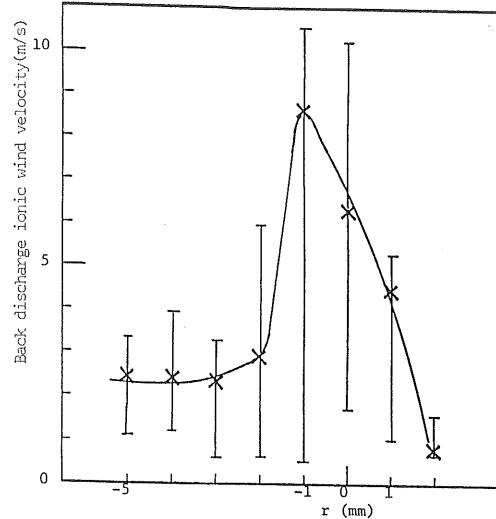


図 12 密集したピンホール近傍の逆電離イオン風速度（ Z 成分）の r 方向分布

Fig. 12 Distribution of back discharge ionic wind velocity (Z -component) along r -axis near the multiple pinholes.

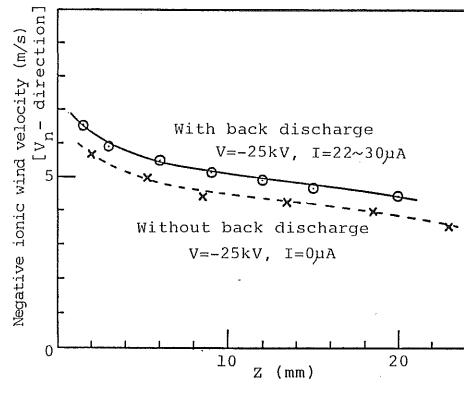


図 13 逆電離発生に伴う針付近の負イオン風（ Z 成分）の変化

Fig. 13 Distribution of negative ionic wind velocity (Z -component) with and without back discharge.

5. 平板に平行な気流が存在する場合の境界層付近におけるサブミクロン粒子の挙動

物体のまわりの流れにおいて、物体表面に沿った粘性の影響の著しい層、境界層が現われる。電気集塵装置内においては、集塵電極表面にこのような境界層ができる。3 章の結果より、イオン風しか存在しない条件の

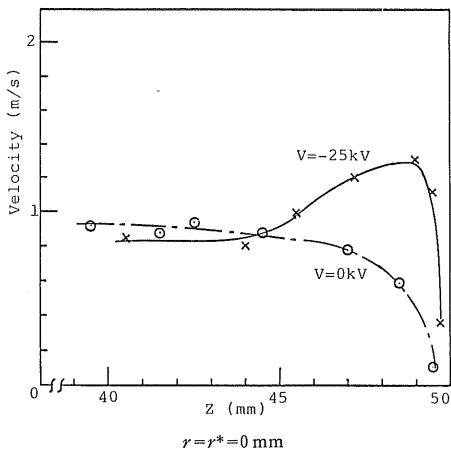


図 14 Z 軸上におけるサブミクロン粒子速度の平板に平行方向成分の分布

Fig. 14 Velocity (r^* -component) distribution of submicron particles along Z -axis near by boundary layer.

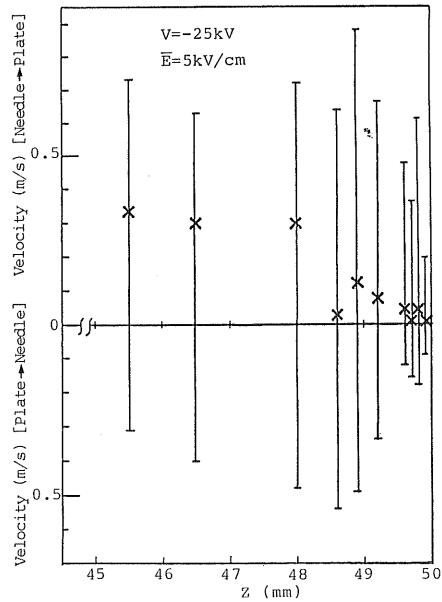


図 15 Z 軸上におけるサブミクロン粒子速度の平板に垂直な方向成分の分布

Fig. 15 Velocity (Z -component) distribution of submicron particles along Z -axis near by boundary layer.

もとでは、サブミクロン粒子は境界層近傍までは負イオン風で運ばれてくると思われるが、外部から平板に平行な気流を供給するときの平板近傍の粒子の挙動は明らかでない。そこで、図 3 の電極で、 r^* 方向に約 1 m/s の速度の空気の流れがある場合の、平板電極近傍における

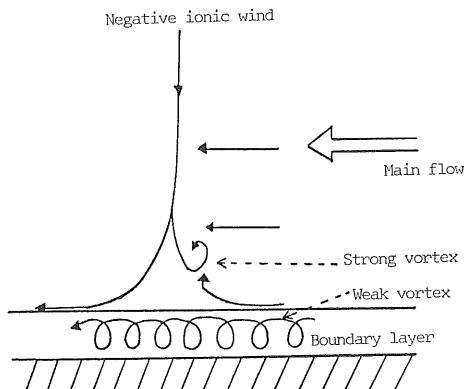


図 16 境界層付近の流れの模式図

Fig. 16 Conceptual representation of gas flow pattern near boundary layer.

サブミクロン粒子 (DOP 粒子) の挙動を研究した。

Z 軸上 ($r=r^*=0$ mm) の各点において、平板に平行方向 (r^* 軸方向) の粒子の速度成分を測定したのが図 14 である。同図より、5 kV/cm の電界をかけることにより境界層の厚さが 5 mm から 1 mm 程度に減少することがわかる。また、 $Z=49$ mm 付近において、 r^* 方向の速度が、約 0.5 m/s から 1 m/s に増加する。

次に、やはり Z 軸上の各点において、平板に垂直方向 (Z 軸方向) の速度成分を測定したのが図 15 である。同図では、針電極から平板電極向きの速度成分 (図 3 における V_n 方向) と平板電極から針電極向きの速度成分 (同 V_n' 方向) を区別している。両方向の成分が存在するということは、その測定領域内において粒子の移動方向が一定ではなく、 V_n 方向に移動することも、また V_n' 方向に移動することもあることを意味している。したがって図 15において、まず粒子の平均速度に対して渦による速度のゆらぎが大きく、サブミクロン粒子の電界による集塵過程は渦によるランダム運動に電界によるドリフトが重なった形で行なわれていることがわかる。また図 7 のごときシャープなイオン風のパターンは完全に姿を消し、これに伴って粒子の移動速度も大幅に低下していることがわかる。そして、平板にごく近い $Z=48.5 \sim 50.0$ mm の範囲では、平均速度は 10 cm/s 程度 (針 → 平板) に低下する。これは DOP 粒子の電気的移動速度に一致し、したがってこの領域ではもはや乱流拡散による輸送効果は失われ、 Z 方向の移動がない渦のみが生じていることを示唆している。 $Z=48.8$ mm 付近の渦はかなり大きく (数十 cm/s)、 $Z=49.8$ mm 付近 (境界層内部) の渦は、10 cm/s 程度と小さくなっている。この様子を模式的に画くと、図 16 のように表わすことができる。なお平板のごく近傍で平均速度がゼロとなっ

ているが、これは粒子がここで停止することを意味しない。なぜならこの領域では粒子はゆらぎによる衝突でいったん平板にトラップされると再び戻ることがないからである。

6. 結 言

- (1) 針対平板電極において、針先からの負イオン風は渦動のためかなり激しく変動し、かつ平板直前までかなり高い、平板に垂直方向の平均速度を保つ(5 kV/cm, 6.4×10^{-4} A/m²で、約 4 m/s)。したがって、電気的移動速度の小さいサブミクロン粒子も、この風によって短時間で集塵電極近傍まで運ばれるものと思われる。しかし、平板に平行方向の空気の流れがある場合には、イオン風のシャープなパターンは完全に失われるとともに境界層のすぐ外側で数十 cm/s 程度の速度の渦ができるので、電気的移動速度がこれ以下の粒子はここで方向反転するものも出てくると思われる。一方、境界層内部では渦が小さいので、ひとたび境界層内にはいれば、サブミクロン粒子も電界によるドリフトで集塵されると思われる。
- (2) 逆電離イオン風は、2~十数 m/s の高い速度を持っていて、破壊点の前方約 1cm、周り数 mm の範囲に吹いている。とくにストリーマモードで、電界 4 kV/cm、電流密度 3.8×10^{-2} A/m² 以上になると、破壊点の真上 1 mm 付近では平均 10 m/s 近くの逆電離イオン風が発生する。したがって、破壊点付近の堆積粒子はこの風によって吹きとばされ、また破壊点付近に飛来した粒子は逆方向に吹き戻されてしまうことが予想される。さらに、逆電離の発

生に伴う針先からの負イオン風の増加が、0.5 m/s 程度にとどまることを考えあわせると、電気流体力学的な立場のみから見ても、逆電離の発生は粒子とくにサブミクロン粒子の集塵にとってはきわめて不利であると考えられる。

- (3) 負イオン風により、境界層の厚みが減少し、平板近傍における平板に平行方向の速度が増加するので、過大な負イオン風は再飛散に影響を与えることが予想される。
- (4) レーザ・ドップラー速度計は非接触、高分解能等のメリットがあるので、近年、炎の流速測定や生体の血流測定など多くの分野で使われるようになってきた。この速度計はあくまでも流体とともに移動している数 μm 程度の大きさの粒子の速度を測るものであるが、一方、電気集塵においても対象とするのはあくまでもダスト粒子である。したがって、この分野はレーザ・ドップラー速度計の特徴が最も生かせる分野の一つであるということができる。

なお今後の問題点としてレーザ・ドップラー速度計のパースト信号をもっと強力に発生せしめ、測定値を左右しているのはどの粒径の粒子であるかをより明確にする必要があるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) S. Masuda : Inst. Phys. Conf. Ser., 27 (1975), 157.
- 2) M. Robinson : Trans. Am. Inst. Electr. Eng., Part 1, 86 (1961), 143.
- 3) 増田閃一, 水野 彰, 阿久津顯右: 静電気学会誌, 2, 3 (1978), 188.