

論 文

金網電極の線対平板型電気集塵装置の流れ場に及ぼす影響

茂木完治*, 阿部寛治**, 大久保利一***, 野本幸治***

(1998年1月26日受理)

The Effect of Wire Net Electrode on Flow Field in Duct Type Electrostatic Precipitator

Kanji MOTEGI*, Kanji ABE**, Toshikazu OHKUBO*** and Yukiharu NOMOTO***

(Received January 26, 1998)

Two-stage type electrostatic precipitators (two-stage type ESP) are widely used for air cleaners due to high collection efficiency of submicron particles and low ozone generation. Collection efficiency of two-stage type ESP is affected by corona discharge, structure of collecting section, applied voltage, particle diameter distribution, condition of flow field and *etc.* Flow field is affected by the structure of the device, gas velocity and ion wind generated in corona discharge section. The net electrodes are often set in corona discharge section of two-stage type ESP for air cleaner, but the ion wind in the ESP with the net electrode has not been studied. This paper describes the experimental study on the ion wind in duct type ESP using simulated corona discharge section. Flow field was observed with Schlieren method, and the gas velocity was measured with the hot wire anemometer. As a result, there are 4 patterns of flow field according to the net electrode position. The flow field with lowest turbulent velocity was obtained by addition of net electrodes at upstream and downstream side of corona discharge wire. The most turbulent flow field was obtained by addition of a net electrode at upstream side.

1. はじめに

2 段式電気集塵装置 (Two-Stage type electrostatic precipitator, 略して 2 段式 ESP) は, オゾン発生が少なく, サブミクロン粒子を効率良く除去できるため室内の空気清浄用に広く用いられている. 2 段式 ESP は荷電部と集塵部で構成されている.

集塵率は荷電部の特性, 集塵部の構造と印加電圧, ダストの粒径分布等の種々の要因で決まる¹⁾. これらの要因のほかに, 集塵装置内の流れの状態は再飛散現象などにも関係して集塵率に影響を及ぼす^{2,3)}. また, 流れが層流であるか乱流であるかは, 一般によく知られている Deutsch

の式が完全乱流の仮定で導かれているように集塵率に影響する⁴⁾. 流れに影響を及ぼす要因は装置の機械的構造やガス速度のほかに, ESP においてはコロナ放電に伴って発生するイオン風が考えられる. 集塵装置内の流れ場に関しては多くの研究発表が行われている⁵⁻⁹⁾.

空調用 2 段式 ESP においては荷電部と集塵部が密接に配置され, また高電圧部に手を触れるのを防ぐために荷電部の前後に接地した金網がしばしば取付けられる. しかし金網のコロナ放電によって発生する二次流れ (イオン風) への影響については報告がないようである.

今回, 線対平板型の荷電部に金網電極を置いた場合のコロナ放電により発生する気流の変化を実験的に調べた. 実験では流れ場をシュリーレン法で観測し, また熱線風速計を用いて流れ場の乱れであるガス速度分布と乱流強度分布を測定した. その結果, 荷電部に金網電極を設けた場合の流れ場について有用な知見が得られたので報告する.

2. 金網電極の荷電部内気流への影響

2.1 実験装置と測定方法

実験装置を図 1 に示す. 送風機からの気流はバッファ部を経て整流部を通過し, 一様な気流となって線対平板型の荷電部に入る. 整流部は塩化ビニール製網および直径

キーワード: 2 段式電気集塵装置, 荷電部, コロナ放電, イオン風, 流れ場

*1 ダイキン工業株式会社機械技術研究所 (591-8511 大阪府堺市金岡町 1304) motegi@lab.daikin.co.jp

Mechanical Engineering Laboratory, Daikin Industries, Ltd., 1304, Kanaokacho, Sakai, Osaka 591-8511 Japan

*2 東京大学教養学部 (153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1) Graduate School of Arts and Science, the University of Tokyo, 3-8-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan

*3 大分大学工学部 (870-1192 大分県大分市旦野原 700) Faculty of Engineering, Oita University, 700, Dan noharu, Oita, Oita 870-1192, Japan

6 mm のストローで構成されている。側面は透明アクリル板で荷電部内の流れ場を観察できる。

線対平板型の荷電部は、空調用 ESP の荷電部を模擬して 2 枚のステンレス製平板電極 (200 mm × 500 mm) を極板間隔 100 mm で平行に配置し、その空間の中央にコロナ放電線 (直径 0.17 mm) を配置した。放電線から水平方向を x 軸とし、金網電極の x 方向の配置位置を L とした。放電線から下側平板電極への垂直方向を y 軸とし、下側平板電極の y 方向の配置位置を D とした。 D は 50 mm である。空調用 ESP としては荷電部の極板間隔 $2D=100$ mm は少し大きすぎるが、シュリーレン装置を用いて流れ場を観測するためにこの値を選んだ。コロナ放電線に正の高電圧を印加し、平板電極と金網電極を接地した。

コロナ放電によって生じる二次流れに及ぼす金網電極の影響を観測するため、金網電極 (20 メッシュ) を放電線の上流側のみ、下流側のみ、および上流側と下流側の両方設置した三つの金網配置について調べた。実験は空気を流し、ガス速度を 1 m/s にした。極板間隔の 100 mm を代表値とする Reynolds 数は約 6,700 である。

荷電部における流れを調べるために、2 面対向法によるシュリーレン装置を用いて荷電部内の流れ場の様子を観察し、撮影した。装置は直径 300 mm の 2 枚の凹面鏡と 500 mm の望遠レンズカメラで構成されている。凹面鏡の間隔は実験室の制約から 6 m とした。

コロナ放電の流れ場への影響を調べるため、放電線から 115 mm 上流に直径 0.14 mm のニクロム線を放電線と平行に 10 mm 間隔で 4 本張った。ニクロム線に約 2 A の電流を流して発熱させ、空気を加熱して加熱気流を得て流線と

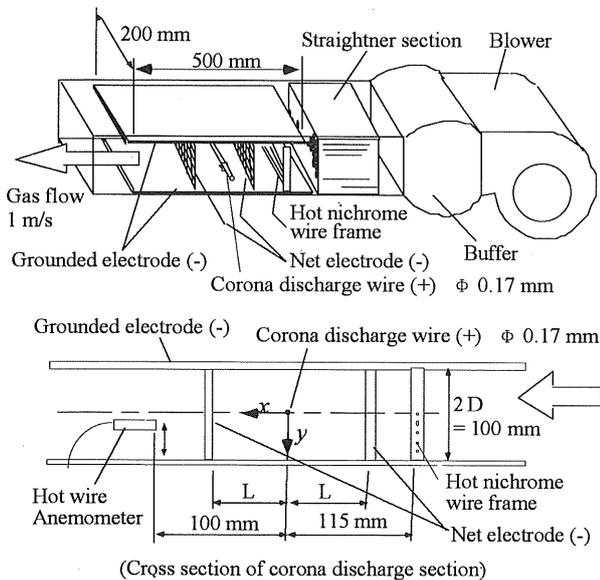


図 1 実験装置

Fig. 1 Experimental apparatus.

した⁹⁾。加熱による気流上昇の影響はガス速度を 0.2 m/s 以下にすると少し現われるが、1 m/s では流線に及ぼす加熱の影響が殆どない事を確認した。

また、流れ場の乱れを確認するために太さ $5 \mu\text{m}$ の極細の熱線の熱線風速計を用いてガス速度分布と速度の変動を測定した。2 段式 ESP の集塵部が荷電部のすぐ下流側に配置される事を考慮して、測定位置は放電線の下流側 100 mm とした。この位置で $y=0$ mm から $y=45$ mm まで 5 mm 毎に変えて、ガス速度分布と乱流強度分布を測定した。測定器の応答性は 100 kHz までの設定が可能であったが、データの安定性を考慮して 10 kHz の応答性で乱流強度を計測した。

2.2 実験結果

2.2.1 コロナ放電特性

金網電極無しの場合と上流側と下流側両方に金網電極を設置した場合の電圧電流特性を図 2 に示す。電流は全電極に流れるコロナ電流である。図は省略したが各電極に対するコロナ電流も個別に測定した。コロナ開始電圧はいずれの場合も約 7.8 kV で、金網電極設置によるコロナ開始電圧への影響は少ない。

コロナ電流は電圧に対して 2 次曲線ではほぼ近似でき、印加電圧 $V=20$ kV で金網電極無しは 0.58 mA/m (平板電極 1 枚当たり 0.29 mA/m) であった。それに対し、金網電極が上流側と下流側の $\pm L=50$ mm ($\pm L/D=1.0$) にある時は $V=20$ kV で 0.89 mA/m であった。これは金網電極無しに比べて約 1.5 倍であり、金網電極の設置によりコロナ電流は増加する。この時、電極への電流値を個別に測ると、1 枚の金網電極と 1 枚の平板電極にほぼ同じ電流 (約 0.22 mA/m) が流れていた。

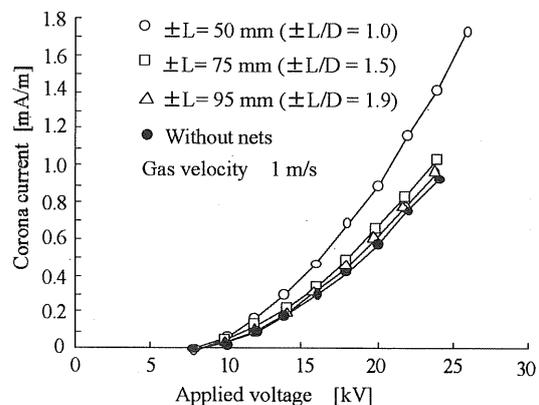


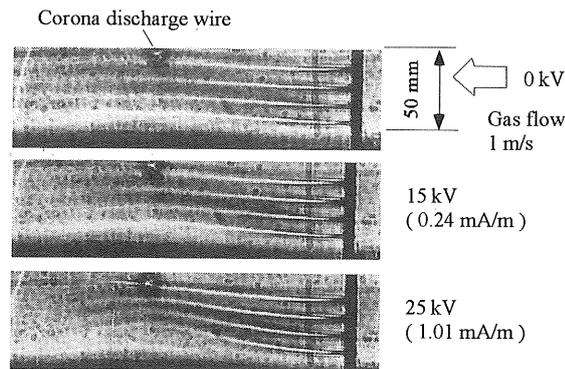
図 2 上流側と下流側に金網電極がある場合のコロナ電流特性

Fig. 2 Characteristics of corona current of the duct type ESP with net electrodes at upstream and downstream side.

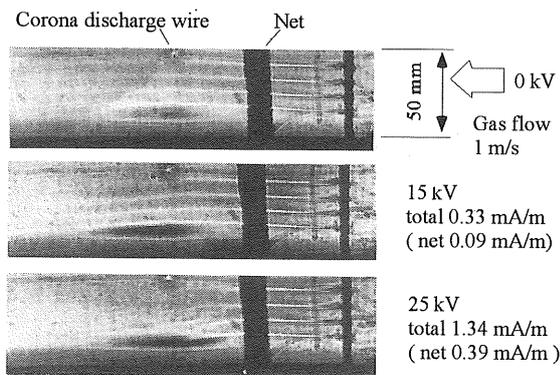
これは放電線から金網電極への距離が平板電極への距離と等しい事による。

また、金網電極への放電によりトータルの電流値は増加するが、平板電極 1 枚当りの電流値は 0.29 mA/m から 0.22 mA/m 減少する。これは金網電極の設置により、空間電流密度分布が変化した事によるものである。

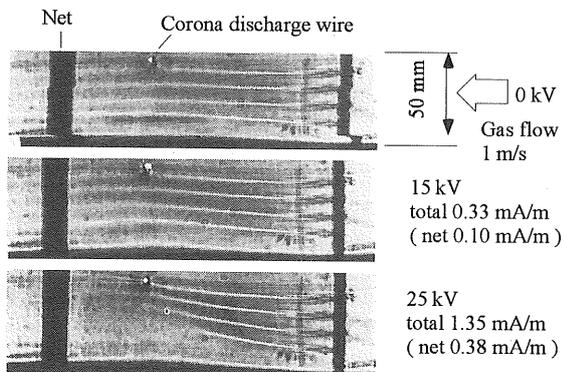
金網電極を放電線から遠ざけると金網電極への放電が減り、コロナ電流は減少して金網電極無しに近づく。±L=95 mm (±L/D=1.9) の場合では 20 kV の時、図 2 に示すようにトータル電流は 0.60 mA/m であっ



(a) Flow field without net.



(b) Flow field with a net at upstream side L=50 mm.



(c) Flow field with a net at downstream side L=50 mm.

図 3 上流側または下流側 L=50 mm に金網電極がある場合の流れ場

Fig. 3 Flow field in the ESP with a net electrode at upstream or downstream side L=50mm.

た。この時、金網電極の設置による全コロナ電流への影響は殆どない。実際、この場合の金網電極へ流れる電流は 1 枚当たりわずか 0.02 mA/m に過ぎなかった。

2.2.2 荷電部の流れ場の可視化

金網電極を設置しない場合のシュリーレン法による加熱気流による流線の写真を、印加電圧をパラメータとして、図 3 (a) に示す。なお、写真は全て中央部 (y=0 mm) から下側平板電極位置 (y=50 mm) までの範囲を示している。ガス速度は 1.0 m/s で、右から左へ流れている。

コロナ放電線への印加電圧が 0 kV の時にはニクロム線加熱の影響は見られず、流線は装置に沿ってほぼ直線的に流れる。印加電圧を上げると 15 kV (0.24 mA/m) 付近から流れが乱れる。放電線の上流側では放電線に向かって引き付けられ、下流側では平板電極に向かった。25 kV (1.01 mA/m) ではコロナ放電による二次流れの影響が大きくなり、放電線直下の平板電極近傍では渦が観測された。コロナ放電により流れ場に乱れが生じており、25 kV では放電線より下流側で乱れの影響が顕著である。

金網電極を上流側 50 mm (L/D=1.0) に設置した場合のシュリーレン写真を図 3 (b) に示す。図で (net...) の電流値は金網電極 1 枚当りに流れる電流値を示す。金網電極は枠に取り付けられているため、図では太く写っているが実際には 1 mm 以下の厚みである。印加電圧 15 kV (0.33 mA/m) 付近から流れに変化が現われる。加熱気流による流線は金網電極を過ぎて平板電極方向に向かっている。この時平板電極近傍でのガス速度は増加している (2.2.3 参照)。これはコロナ電流が平板電極だけでなく、上流の接地した金網電極にも流れて、空間の電流密度分布が変化したためである。そのためこのようなイオン風の影響が現れたと考えられる。平板電極近傍での速度増加による再飛散現象への影響を考慮すると、金網電極を上流側に設置するのは好ましくないと考えられる。

金網電極を下流側 50 mm (L/D=1.0) に設置した場合のシュリーレン写真を図 3 (c) に示す。上流側に金網電極を設置した場合と同様に印加電圧 15 kV (0.33 mA/m) 付近から流れに変化が現われる。コロナ電流が下流側の接地した金網電極にも流れ、流れ場の流線は上下から放電線が通る中央部 (y=0 mm) に向けて集まっている。この時、放電線下流側で平板電極近傍でガス速度が遅くなっているのに対し、中央部の流速は速くなっている (2.2.3 参照)。下流側の金網電極に流れるコロナ電流は上流側に金網電極がある場合とほとんど同じであった。

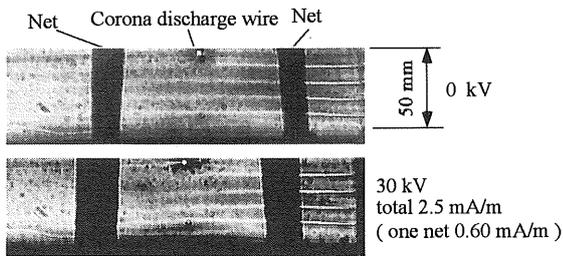
金網電極を上流側と下流側の両方 ±L = 50 mm (=L/D=1.0) に設置した場合のシュリーレン写真を図 4

(a) に示す. 図で (one net...) の電流値は金網電極 1 枚当りに流れる電流値である. 2.2.1 で述べたようにコロナ電流は放電線を中心にして平板電極と金網電極にはほぼ均等に流れており, コロナ電流密度分布は周囲に均等に放電する線対円筒の場合に比較的近いと考えられる.

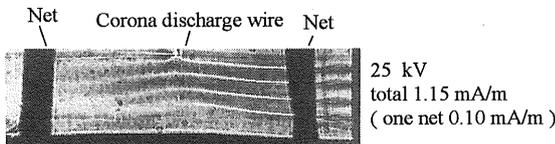
金網電極を両側に設置した場合, イオン風の流れ場への影響は比較的小さく, 電圧が 30 kV の時でも印加電圧 0 kV の時と同様に気流はほぼ平板電極と平行に流れる. これは, 線対円筒の場合同様に断面全方位にイオン風が流れようとするがガスの供給が少ないためイオン風が微弱になるためと考えられる.

金網電極の設置位置 L の影響を図 4 (b), (c) に示す. (b) は $\pm L=75 \text{ mm}$ ($\pm L/D=1.5$), (c) は $\pm L=95 \text{ mm}$ ($\pm L/D=1.9$) の位置の場合の実験結果である.

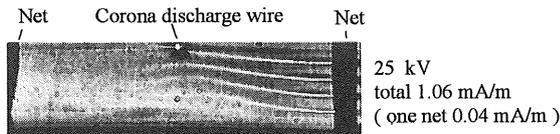
L が 95 mm 以上では金網電極を設置しない場合の気流とほぼ同じである. 空間のコロナ電流密度がイオン風の影響を決定するが, $\pm L/D=1.0$ の場合には比較の流れ場に及ぼすコロナ放電の影響は少なく, $\pm L/D=2$ 程度以上では金網電極へのコロナ電流はわずかであり, 流れは線対平板電極系の場合に近い.



(a) Flow field with nets at upstream and downstream side $\pm L=50 \text{ mm}$.



(b) Flow field with nets at upstream and downstream side $\pm L=75 \text{ mm}$.



(c) Flow field with nets at upstream and downstream side $\pm L=95 \text{ mm}$.

図 4 上流側と下流側の両方 $\pm L=50 \text{ mm}$ に金網電極がある場合の流れ場

Fig. 4 Flow field in the ESP with net electrodes at upstream and downstream side $\pm L=50 \text{ mm}$.

2.2.3 ガス速度分布と乱流強度分布

シュリーレン装置を用いて観測したのと同じ条件で平均ガス速度分布を測定した. 平均ガス速度は熱線風速計で 1 秒間の平均ガス速度値を示す. 放電線の下流 100 mm の位置でのガス速度分布を図 5 に示す. 電圧を印加しない場合は断面全体にわたってほぼ均一に 1.0 m/s で流れている.

金網電極無しの場合 (図 5 (a)), シュリーレン写真では 15 kV から変化が現われるのに対し, 20 kV (0.64 mA/m) 以上で変化が現われる. 25 kV (1.01 mA/m) で平板電極近傍の流速はコロナ放電によるイオン風のため増加し, 中央部 ($y=0$) で減速している.

金網電極を放電線の上流側 50 mm ($L/D=1.0$) に設置した場合 (図 5 (b)), シュリーレン写真から推定されるように, 平板電極近傍の流速は, コロナ放電によるイオン風のため印加電圧がコロナ開始電圧以上では増加する. 印加電圧 $V=25 \text{ kV}$ の時, 平板電極の近傍から $y=25 \text{ mm}$ まで約 1.6 m/s である. さらに放電線に近づくとき急速に減速し, 中央部 ($y=0$) で 0.4 m/s である.

金網電極を放電線の下流側 50 mm ($L/D=1.0$) に設置した場合 (図 5 (c)), イオン風の影響で中央部 ($y=0$) でガス流速は加速され, 平板電極近傍では減速される. 印加電圧 $V=25 \text{ kV}$ では中央部 ($y=0$) でガス速度は 1.53 m/s になる. 平板電極に近づくに従って単調に減速して平板電極近傍 ($y=45 \text{ mm}$) では約 0.5 m/s であった.

金網電極を上流側および下流側の両方 $\pm L=50 \text{ mm}$ ($\pm L/D=1.0$) に設置した場合 (図 5 (d)), 金網を上流側のみに設置した場合や下流側のみに設置した場合に比べて, コロナ放電のガス速度分布への影響は極めて小さい. 印加電圧 $V=25 \text{ kV}$ の場合, 中央で 1.4 m/s であるが, $y=20 \text{ mm}$ から平板電極近傍まで殆ど影響を受けていない.

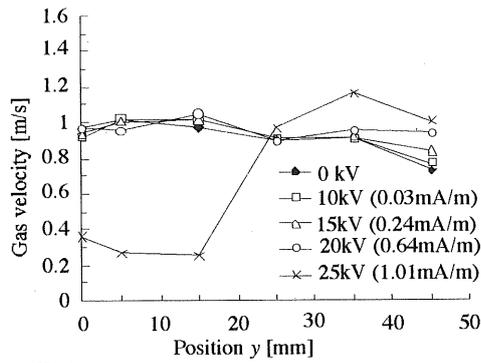
ガス流速には平均値に対して時間的に変動する成分が含まれている. 本論文では平均化時定数を 1.0 秒とし, ガス速度瞬時値と平均ガス速度の差の実効値 (r.m.s.) を求めて乱流強度とした. ガス流速に含まれる乱流強度成分は, 微粒子の集塵性能に大きく影響する事が知られている^{2, 10, 11}).

金網電極を設置した場合, コロナ放電線の下流側 100 mm の位置における乱流強度分布を図 6 に示す.

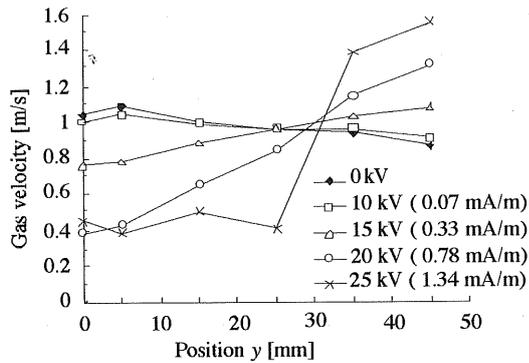
電圧を印加しない場合, 平板電極近傍の限られた領域を除いて乱れは極めて小さい.

金網電極無しの場合 (図 6 (a)), 20 kV でも平均ガス速度分布は変化が無いが, 乱流強度はシュリーレン写真と同じように, 15 kV から増加し, 断面全体では中央部 ($y=0$) で乱れが多少大きい.

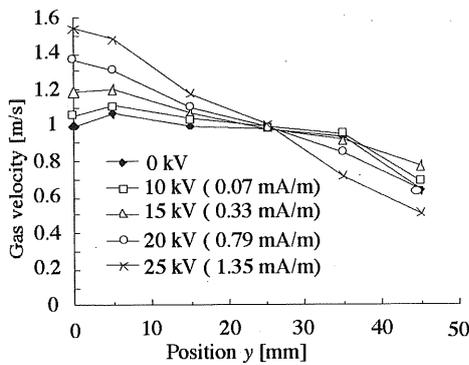
金網電極が上流側 50 mm ($L/D=1.0$) にある場合



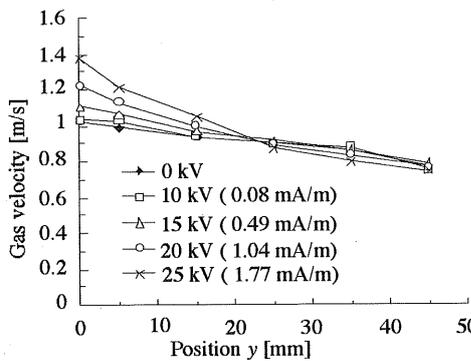
(a) Without wire net.



(b) Upstream side L=50 mm.

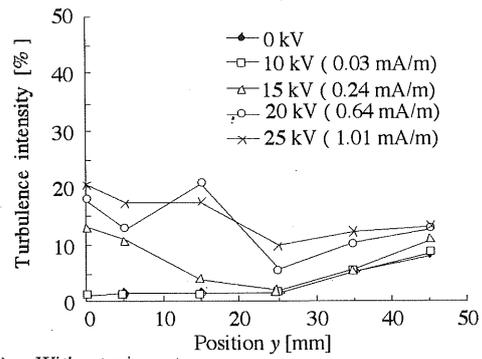


(c) Downstream side L=50 mm.

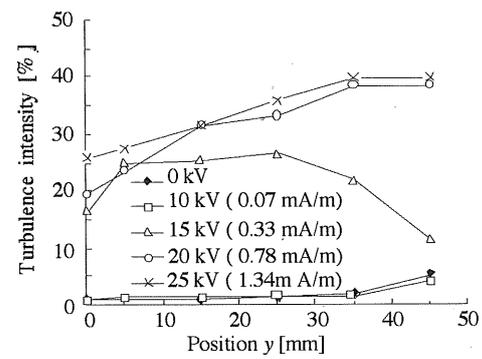


(d) Upstream side and downstream side $\pm L=50$ mm.

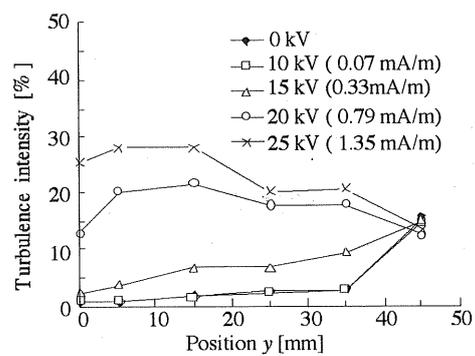
図 5 金網電極のガス速度分布への影響
Fig. 5 Gas velocity distribution in the ESP with net electrode.



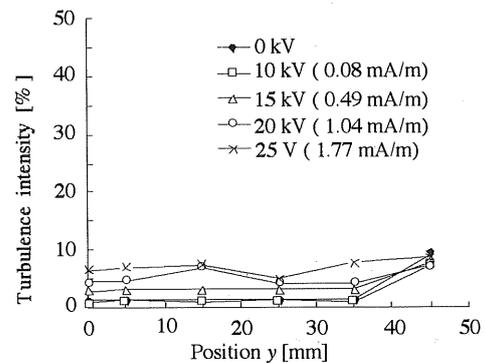
(a) Without wire net.



(b) Upstream side L=50 mm.



(c) Downstream side L=50 mm.



(d) Upstream side and downstream side $\pm L=50$ mm.

図 6 金網電極の乱流強度に与える影響
Fig. 6 Distribution of turbulence intensity in the ESP with net electrode.

(図 6 (b)), 平板電極近傍の乱流強度は, コロナ放電によるイオン風のため空間全体にわたって増加している。

印加電圧 $V=25$ kV の場合, 中央部 ($y=0$) から平板電極近傍方向に乱流強度は増加し, 平板電極近傍では平均流速の 40% に達している。

金網電極が下流側 50 mm ($L/D=1.0$) にある場合 (図 6 (c)), 平板電極近傍以外では印加電圧とともに乱流強度は増加している。印加電圧 $V=25$ kV の場合, 断面にわたって, 約 10~20% 増加している。

金網電極が上流側および下流側の両方 $\pm L=50$ mm ($\pm L/D=1.0$) にある場合 (図 6 (d)), 金網を上流側のみに設置した場合や下流側のみに設置した場合に比べて, コロナ放電の乱流強度分布に及ぼす影響は極めて小さい。印加電圧 $V=25$ kV の場合でも断面にわたってほぼ均一で, 約 5% 程度であった。

ところで, 2 段式 ESP のコロナ放電部に金網電極を設置することで集塵率向上が報告されている^{12,13)}。それによれば, 集塵率は放電線と金網電極の距離の影響を受ける。コロナ電流に対する性能は, 金網の距離が近いと性能は低く, 距離を離すに従い性能が高くなり, 極大になる位置があるようである。金網電極の 2 段式 ESP の集塵率へ及ぼす影響としては, コロナ放電により生じるイオン風の影響以外に, コロナ電圧電流特性及び空間電流密度分布が影響を受け荷電効率が変化することが考えられる。従って, 金網電極による集塵効率の向上を検討する場合はこの 2 つの要因を考慮して決めなければならないであろう。

3. まとめ

荷電部への金網電極の設置による流れ場に対する影響について調べた。それをまとめると以下の通りである。

- 1) 荷電部の流れ場に及ぼすイオン風の影響をシュリーレン法で可視化することにより, 実験的に明らかにした。金網電極の有無, 設置位置により 4 つの気流パターンを明らかにして, イオン風の影響を分類した。
- 2) 金網電極を設置した場合の下流側 100 mm 位置における平均ガス流速分布を測定した。シュリーレン法で観測した結果と併せて, ガス流速分布に及ぼすイオン風の影響を種々の金網配置の場合について明らかにした。

金網電極を上流側に設置した場合, 平板電極近傍の流速はイオン風の影響で増加し, 中央部で減速する。印加電圧 $V=25$ kV (1.34 mA/m) の場合, 平板電極近傍で約 1.6 m/s に達し, 中央部 ($y=0$) では 0.4 m/s に減速し, 大きく影響を受けた。金網電極を放電線の両側に設置した場合, コロナ放電がガス流速分布に及ぼす影響は極めて小さい。 $V=25$ kV でも放電線近傍を除いて殆ど影響を受けていない。

3) 金網電極を設置した場合の下流側 100 mm における乱流強度分布に及ぼすコロナ放電の影響を明らかにした。

金網電極を上流側設置した場合, 乱流強度はコロナ放電の影響を強く受ける。その結果, 平板電極近傍では平均流速の 40% に達するのに対し, 金網電極を放電線の両側に設置した場合, 乱流強度分布は $V=25$ kV (1.77 mA/m) でも断面にわたってほぼ均一で約 5% 程度と小さかった。

最後に本実験に当たり適切なお意見をいただきました大分大学工学部の金沢誠司講師に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤泰郎, 久保田強, 瑞慶覧章朝, 高橋武男, 新貝和照, 宮本昌広, 吉持達郎: 電気設備学会誌, **15** (1995) 113
- 2) R. M. Felder and E. Arace-Medina: *AIChE J.*, **31** (1985) 82
- 3) A. G. Hein: *JAPCA*, **39** (1989) 766
- 4) S. A. Self, M. Mitchner, K. D. Khim, D. H. Choi and R. Leach: *Proceedings of 2nd ICESP, Kyoto*, p.249 (1984)
- 5) 足立宜良, 川崎元之, 中林広光: 静電気学会誌, **4** (1980) 152
- 6) T. Yamamoto and H. R. Velkoff: *J. Fluid Mech.*, **108** (1981) 1
- 7) C. G. Noll, T. Yamamoto: *Environ. Int.*, **6** (1981) 261
- 8) 渡辺恒雄: 静電気学会誌, **10** (1986) 477
- 9) 大久保利一, 村上昭年, 足立宜良: 電気学会論文誌, **A106** (1986) 377
- 10) P. Atten, F. M. J. McCluskey and A. C. Lahjomri: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **1A-23** (1987) 705
- 11) G. L. Leonard, M. Mitchner and S. A. Self: *Atmospher. Environ.*, **14** (1980) 1289
- 12) D. Cucu and J. Lippold: *J. Electrostat.*, **17** (1985) 109
- 13) 足立宜良, 河内山泰彦, 柿本明久, 伊藤富男, 榎田達海, 茂木完治: 静電気学会講演論文集'90, p.255, 静電気学会 (1990)