

.....
 論 文

移動電極型電気集塵装置におけるダスト層付着力と払落し

三坂俊明^{*1}, 大浦 忠^{*}, 有光武雄^{*}

(2005年12月7日受付; 2006年3月23日受理)

Adhesive Force and Dislodge of Dust Layer on a Collecting Plate Surface for a Moving Electrode Type Electrostatic Precipitator

Toshiaki MISAKA^{*1}, Tadashi OURA^{*} and Takeo ARIMITSU^{*}

(Received December 7, 2005; Accepted March 23, 2006)

It is important to improve the collection efficiency of high resistivity dust particles in an electrostatic precipitator. The moving electrode type electrostatic precipitator, which is equipped with brushes to dislodge dust particles from the moving collecting plate surface, is effective for collecting high resistivity dust particles. This paper describes a study of adhesive force of dust layer on collecting plate surface and dislodgement methods of dust layer from the collecting plate in an electrostatic precipitator. In the case of FCC (Fluid Catalytic Cracker) dust (dust resistivity= $3 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$), an adhesive force of dust layer exceeds $8,400 \text{ N/m}^2$, and it is difficult to dislodge the dust layer by the conventional mechanical rapping system in a collecting plate. For dislodgement of dust layer, the rotating brush type dust removal device was observed to be effective to dislodge dust layer from collecting plates.

1. はじめに

工業用電気集塵装置は高集塵率でダストを捕集でき、圧力損失が小さい省エネルギーな装置で、信頼性が高いことから排ガス中のダスト除去用環境機器として広く用いられている¹⁾。電気集塵装置の集塵性能を阻害する要因には高抵抗ダストによる逆コロナ、微細・高濃度ダストによる空間電荷効果、集塵極捕集ダストの再飛散などがある。このうち最大の課題は高抵抗ダストで発生する逆コロナによる集塵性能低下の克服といえる²⁾。

電気集塵装置で逆コロナを抑制して集塵性能を高く保つには、(1)ダスト電気抵抗率を低下させる、(2)集塵板上のダスト層を流れる電流を制御する、(3)集塵板に捕集したダスト層を完全に除去するなどの対策が必要となる。具体的には高温集塵³⁾や低温集塵、低々温集塵⁴⁾のように電気集塵装置の処理ガス温度を調整してダスト電気抵抗率を低下させる方法がある。また、ガス中の水分を増加させる調湿やSO₃などの

化学物質を添加する調質⁵⁻⁷⁾などの方法がある。石炭燃焼によるフライアッシュの集塵では炭灰や混焼⁸⁾などによってダスト電気抵抗率を低下させることも実施されている。

ダスト層の電流制御方法には間欠荷電⁹⁾とパルス荷電¹⁰⁾があり、間欠荷電は広く実用化されている。ダスト層を完全に除去して逆コロナを抑制する方法はさまざまな考案がなされ¹¹⁾、基礎的実験で高抵抗ダストの集塵に有効なことは認められていた¹²⁾。しかし、ダスト層を完全に除去する方式は大型化が困難なことから実験段階にとどまっていた。工業的に使用できる実規模の電気集塵装置は移動電極方式の研究開発によってはじめて実用化された。

本論文では(1)移動電極型電気集塵装置の概略構造、(2)ダスト層の付着力と払落し方法、(3)放電特性に対するダスト層厚さの影響、(4)回転ブラシの払落し効果について実験・検討した研究結果について報告する。

2. 移動電極方式の概略構造

固定電極方式と移動電極方式の概略構造を比較して図1に示す。電気集塵装置は放電極と集塵極から構成されている。処理ガスに含まれるダストを放電線からのコロナ放電で帯電して、電界との間で生じるクーロン力で集塵板に捕集する。従来の固定電極方式は捕集したダストをハンマによる機械

キーワード：電気集塵装置、高抵抗ダスト、逆コロナ、ダスト付着力、槌打払落し

* (株)日立プラントテクノロジー (170-8466 東京都豊島区北大塚 1-13-2)

Hitachi Plant Technologies, Ltd. 1-13-2 Kita-Otsuka, Toshima-ku, Tokyo, 170-8466 Japan

¹ toshiaki.misaka.sn@hitachi-pt.com

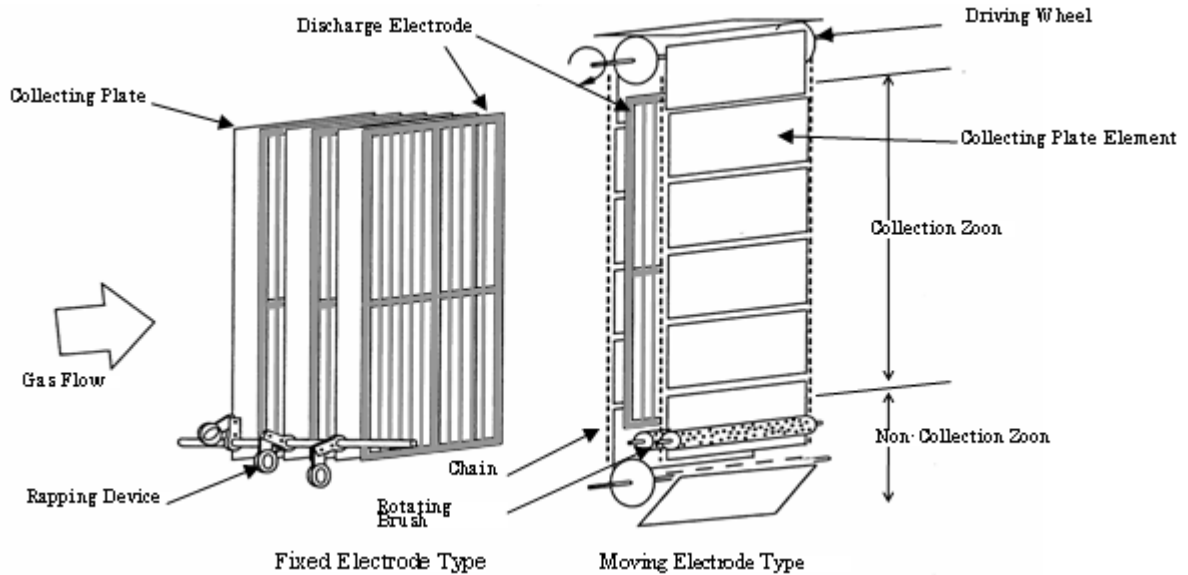


図1 固定電極方式と移動電極方式電気集塵装置の比較
Fig.1 Schematics of fixed electrode type and of moving electrode type electrostatic precipitators.

的な槌打振動加速力で集塵板から剥離してホッパに払い落としている。しかし高抵抗ダストを電気集塵する場合、集塵板は槌打を繰り返しているうちに微細な高抵抗ダストによって覆われて機械的な槌打では払落しできなくなる。その結果、集塵板は微細な高抵抗ダストの層で覆われる。この高抵抗ダスト層で逆コロナが発生するために集塵性能が低下する。この付着力の大きい高抵抗ダスト層を集塵板から取り除くことができれば、安定的に高抵抗ダストを集塵することが可能となる。

移動電極方式では集塵板を短冊状に分割し、チェーンで連結して移動可能とした。ガス中のダストは放電極の設置してある集塵域で集塵極エレメントに電気集塵される。集塵極エレメントに捕集したダストは集塵極エレメントと共にガス流れのない下部の非集塵域に移動して、回転ブラシで機械的に完全に掻き落とす。移動電極方式は乾式で集塵板を常に清浄に保ち逆コロナを抑制して高抵抗ダストを効率よく捕集できる。集塵板に水膜を作りダストを捕集する湿式電気集塵

装置も集塵板での逆コロナを防ぐことができるが、捕集ダストがスラリーとなり廃水処理が必要となる等の問題があり、乾式で高抵抗ダストを捕集できる利点は大きい。移動電極方式による高抵抗ダストの電気集塵では、集塵極に捕集したダストの払落しが重要な課題であり、従来から行われている槌打力による払落しの限界を知ることも必要となる。

3. ダスト層の付着力と払落し方法

3.1 ダスト付着力の測定方法

ダスト層の付着力と槌打力、ダストの払落しについては多くの報告などがあるが^{13,14)}、いずれもダスト電気抵抗率と付着力の定量的関係については十分に述べられていない。特に激しい逆コロナの発生する $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ の高抵抗ダストを対象とした槌打払落しについては検討を要する。

そこで、電気集塵装置の集塵板におけるダスト層の付着力と槌打力、ダスト払落し方法の検討を行うために、処理ガス量 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ の小型電気集塵装置を用いて実験を行った。実

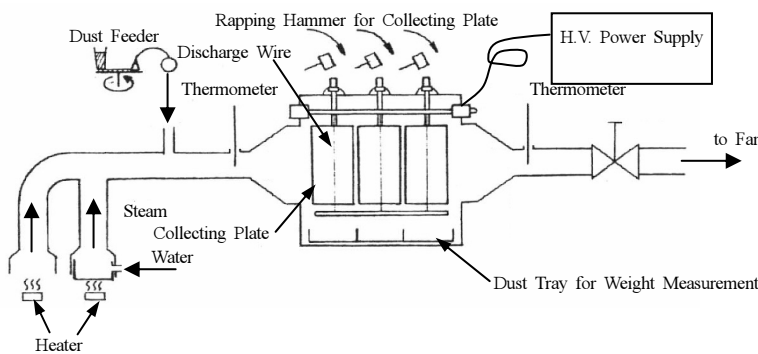


図2 槌打払落し実験装置

Fig. 2 Test apparatus used for rapping dislodgement of collected dust.

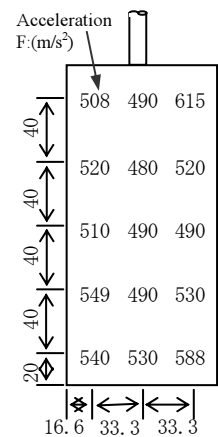


図3 集塵板の槌打加速度分布
Fig.3 distribution of rapping acceleration of collecting plate.

表1 試料ダストの特性
Table 1 Property of sample dust.

Sample Dust	Dust Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Gas Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Gas Humidity (%Vol.)	Particle Diameter (μm)	Specific Gravity
(A) Heavy Oil Fired boiler	7.0×10^3	130	3	1.8	2.18
(B) Municipal Refuse Incinerator	6.8×10^8	260	20	5.7	2.27
(C) Cement Clinker Cooler	4.5×10^{10}	250	5	50	3.22
(D) Pulverized Coal Fired Boiler	7.5×10^9	330	10	28	2.07
(E) Pulverized Coal Fired Boiler	9.0×10^{11}	150	10	28	2.07
(F) Fluid Catalytic Cracker (FCC)	3.8×10^{14}	200	15	15	2.21

験装置を図2に示す¹⁵⁾。集塵板は高さ200 mm, 幅100 mmの平板を用い, ガス流方向に6枚設置した。集塵板の厚みは4 mm として槌打加速度が集塵板全体で均一になるように考えた。槌打加速度は集塵板に圧電型加速度ピックアップを取付けて測定した。集塵板の槌打加速度分布測定結果の一例を図3に示す。槌打加速度は集塵板全体でほぼ一様となっていた。そこで以後の実験は集塵板の中央に加速度ピックアップを取付けて測定した。

表1に示すように試料には高抵抗ダストのほか、電気集塵の対象となる低抵抗領域、正常集塵領域のダストも用いた。

集塵板のダスト払落し状況を観察すると、集塵板に到達したダストは重なり合うように付着して、全面にわたって一様に厚さを増していく。ダスト層を槌打で払い落とすと図4に示すように、集塵板の槌打加速度がある値以上に達している部分では初層を残して捕集したダストの全量が一度に剥離して、他の部分では全く剥離しないという現象を示していた。この現象から、電気集塵装置における槌打払落し時のダストの付着力は、剥離の臨界状態でダスト層に作用している力に等しいと考えて、次式で求めた。

$$F = M \times \alpha \tag{1}$$

ここで、F : 槌打によってダスト層に作用する力(N/m²)、M : 集塵板単位面積当たりのダスト層の質量(kg/m²)、 α : 集塵板の槌打加速度(m/s²)である。

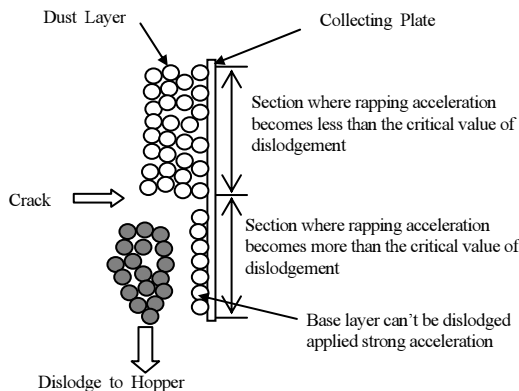


図4 槌打払落しの模式図
Fig.4 Schematic of the rapping dislodgement.

3.2 荷電電圧と付着力

放電極への荷電電圧を変えながら、各々の試料について集塵板に捕集したダスト層を槌打によって払い落とすときの付着力を測定した。荷電電圧を放電線と集塵板の距離で除した見掛け電界強度と付着力の関係について測定した結果を図5に、付着力測定結果をダスト電気抵抗率で整理したものを図6に示す。

図5で試料ダスト(A)の重油焚きボイラから発生するカーボン質の低抵抗ダストは荷電電圧に無関係に小さな付着力を示している。ダスト電気抵抗率が $10^8 \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ の試料ダスト(B)~(E)は見掛け電界強度を上昇させると付着力が大きくなっていく。付着力の増加割合はダスト電気抵抗率が高くなるほど大きくなる傾向を示している。特に試料ダスト(F)の石油流動接触分解装置から発生するFCC触媒ダストはダスト電気抵抗率が $3.3 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ と高く、付着力が8,400 N/m²と他のダストに比べて強い値を示している。図6から付着力はダスト電気抵抗率が高くなると急激に増加し、見掛け電界強度を増すとさらに上昇した。これは高抵抗ダスト層に加わるクーロン力とジョンソン-ラーベック力が上昇したためと考えられる¹⁶⁾。

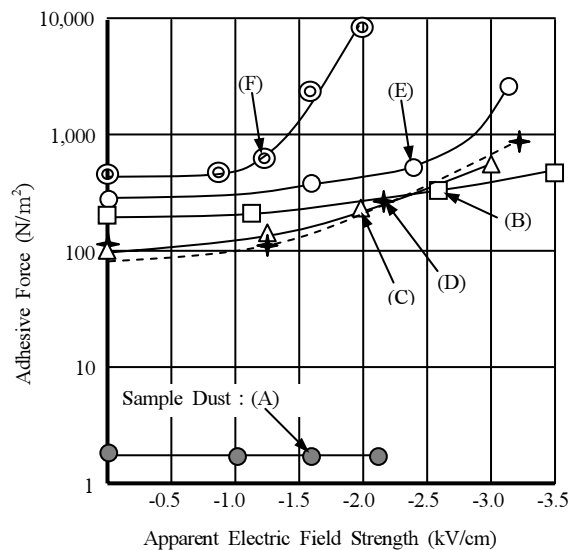


図5 見掛け電界強度とダスト層の付着力
Fig.5 Apparent electric field strength vs. adhesion force of dust layer.

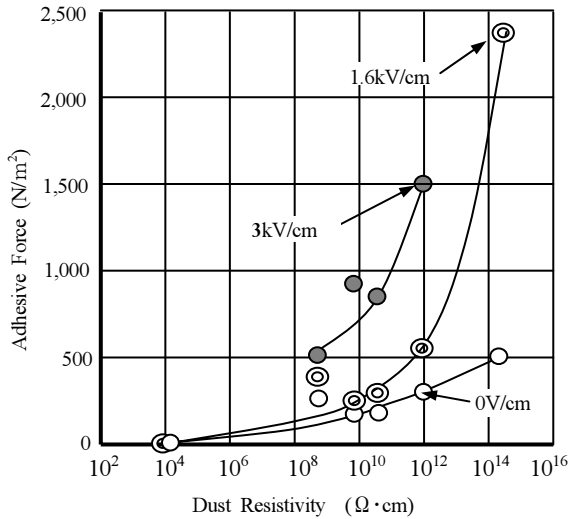


図6 ダスト電気抵抗率と付着力
Fig.6 Dust resistivity vs. adhesive force of dust layer.

図7には、フライアッシュを試料として3kV/cmの荷電状態でガス中水分量を調節しながら測定したダストの付着力とダスト電気抵抗率の測定結果を示す。ガス中水分の増加によりダスト電気抵抗率は減少し、付着力も3割程度減少している。調湿は、スパーク頻発や逆コロナなどの高抵抗ダスト障害を防ぐために行われるが、ダストの槌打剥離性を良くする効果を期待できることがわかる。なおFCC触媒ダストの場合にはガス中にすでに15%の水分を含んでおり、水分量を増加することで槌打剥離効果を向上することは期待できなかった。

3.3 ダスト層厚さと放電特性

放電特性から高抵抗ダストによる逆コロナの解消条件を求めるために、FCC触媒ダストでダスト層の厚さと放電特性の関係を求めた。ダスト層の厚さは10mm角の鋼箔を集塵板表面に固定して、放電特性を測定した直後の鋼箔に付着したダスト層厚さを光学顕微鏡で測定して求めた。

図8にダスト層厚さと放電特性の関係を示す。FCC触媒ダ

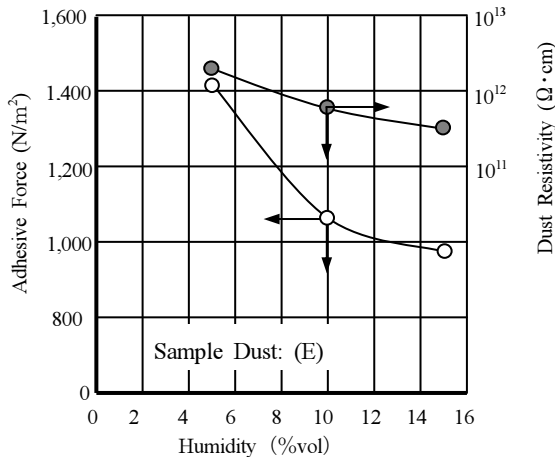


図7 水分量と付着力及びダスト電気抵抗率
Fig.7 Humidity vs. adhesive force and dust resistivity.

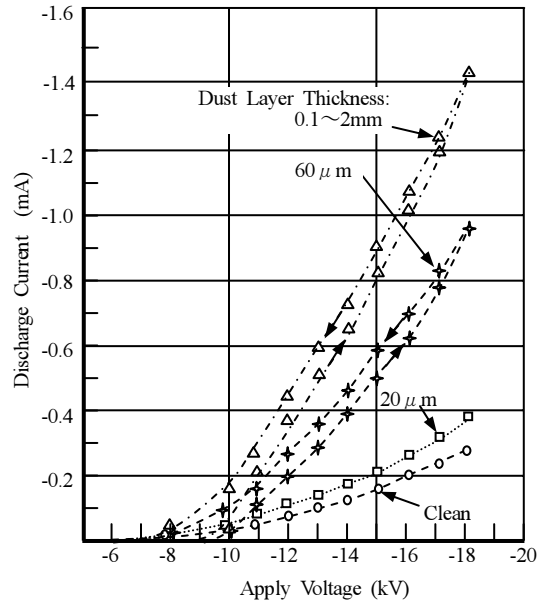


図8 ダスト層厚さと放電特性
Fig.8 Dust layer thickness vs. V-I characteristics.

ストの場合、ダスト層厚さが20~40μmと極薄く集塵板に付着した状態で、集塵板が清浄なときに比べて放電電流はやや増加している。このとき集塵板の素地が薄く見えており、逆コロナによる発光は目視できない。

ダスト層厚さが60μmになると、逆コロナの放電特性を示しはじめる。放電線の荷電電圧を上昇すると、コロナ放電を開始する8~10kVで電流が不安定になり、急増する点が見れる。10kV以上の電圧では、集塵板が清浄なときよりも放電電流が増す。電圧降下時の放電電流を計測すると、電圧上昇時の計測値よりも大きな電流値となり、ヒステリシスカークを描き、逆コロナの放電特性を示す²⁾。

ダスト層厚さ100μmでは逆コロナの放電特性がさらに顕著となる。100μm以上になると、集塵板上に逆コロナによる強い発光が見られた。逆コロナのため集塵率は低下しているが、集塵板上のダスト層厚さが2mm程度になるまでは実験的に集塵可能であった。このときの放電特性は100μmの逆コロナの放電特性とほぼ同様であった。しかし、2mm以上のダスト層厚さで集塵することはできなかった。

3.4 ダスト層払落し方式

FCC触媒ダストを集塵限界層厚の2mmまで集塵した後、槌打力を変化させながらダスト層の払落しを行い、放電特性の変化を測定した。槌打による放電特性の変化を図9に示す。集塵板は金属疲労による集塵板の破壊を考慮して、槌打加速度は一般に1,400m/s²程度で設計している。FCC触媒ダストはこの槌打加速度でダスト層を払い落とすことができず、放電特性の改善もほとんど見られなかった。槌打加速度を増していくと、通常の機械式槌打による集塵板の槌打加速度より

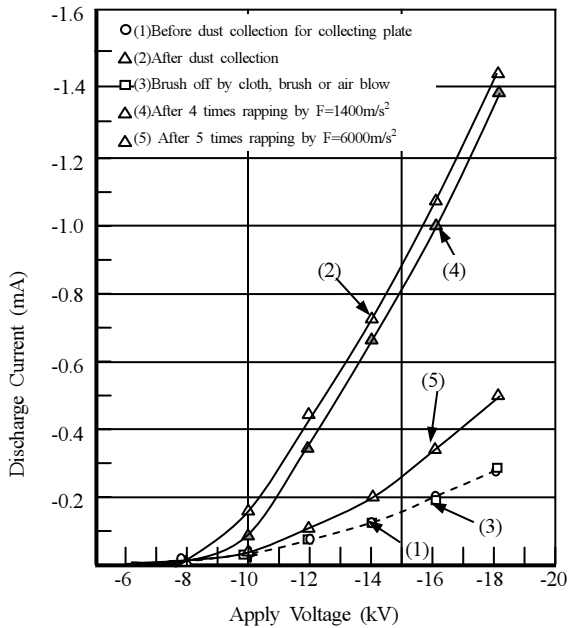


図9 ダスト払落し効果と放電特性

Fig.9 Effect of dust dislodgement on the V-I characteristic.

もはるかに大きい $6,000 \text{ m/s}^2$ 、5回の槌打で捕集ダストを払い落とすことができ、放電特性も相当に回復が見られた。槌打加速度測定値とダストの見掛け比重測定値 0.7 を用いて式(1)から求めたダスト層の付着力は $8,400 \text{ N/m}^2$ となる。工業用電気集塵装置の集塵極槌打加速度は一般に $1,400 \text{ m/s}^2$ 程度で設計している。この $6,000 \text{ m/s}^2$ の槌打加速度は集塵板の金属疲労を考えると4倍程度大き過ぎる。槌打力でダストを払落して逆コロナを阻止することは困難と考えられた。

集塵極上のダスト層を完全に除去する方法として、布で拭いた場合、ブラシで掃いた場合、エアブローした場合について放電特性を測定した。目視では薄いダスト層の付着が見られるが、図9中の(3)に示すように、放電特性は集塵板が清浄なときの状態に復帰することがわかった。この実験装置による測定では3つの方式で放電特性に大差は見られず、高抵抗ダストをブラシなどで集塵板から払い落として集塵板表面を常に清浄に保てば逆コロナを防止して高抵抗ダストの集塵が可能となることが明らかになった。

工業用の大型電気集塵装置で集塵板上の高抵抗ダスト層をブラシなどで掻き落すことが常時できるならば、FCC触媒ダストのような高抵抗ダストであっても電気集塵できる可能性があると考えた。

4. ブラシ形状と払落し

4.1 パイロット実験装置

ブラシ方式が槌打方式よりもダスト払落し効果が高いと

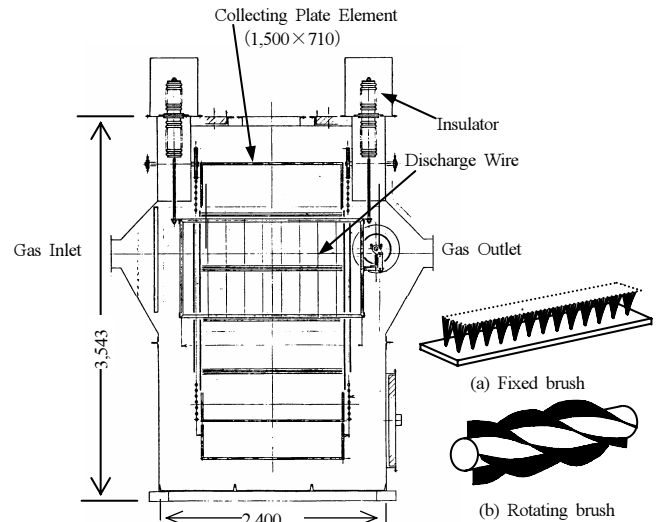


図10 移動電極方式パイロット集塵装置

Fig.10 Moving electrode type electrostatic precipitator.

いう実験結果に基づいて、各種ブラシ形状を考案してダストの払落し効果をパイロット集塵装置で検討した。図10は実験に使用した処理ガス量 $3,000 \text{ m}^3/\text{h}$ の移動電極方式によるパイロット電気集塵装置の概略を示している。集塵極は2レーンで3ダクトからなっている。

ブラシには図10(a)のブラシ素線束を2列に植込んである固定ブラシと、(b)のブラシ素線をシャフトに螺旋状に植込んだ回転ブラシを試作して使用した。

4.2 ブラシ形状と払落し効果

ブラシによる捕集ダストの払落し効果を観察した。固定ブラシで集塵極エレメントに捕集したダストを払い落とした場合は図11(a)に示すように集塵極エレメントに筋模様に残るダストが残る現象が見られた。また固定ブラシはブラシへのダストの付着量が多く、電気集塵装置の休止時などに吸湿でブラシにダストが固着することが懸念された。

回転ブラシは図11(d)に示すように、ダストの払落し効果が固定ブラシより良かった。回転ブラシはシャフトの4方向にブラシ素線を2列に植え込んで、回転駆動している。このためブラシに食い込んだダストは弾き飛ばされており、ブラシへのダスト付着は少なかった。

回転ブラシは、ブラシの回転数 n (rpm)、集塵極エレメントの移動速度 L_v (m/min)、ブラシ素線が1回の払落し動作で集塵極エレメントに接触している距離 L (cm)、によって集塵極エレメントに捕集されているダストの払落し回数 N が異なってくる。 N は次式で求められる。

$$N = n \times 4 \times L / L_v \quad (2)$$

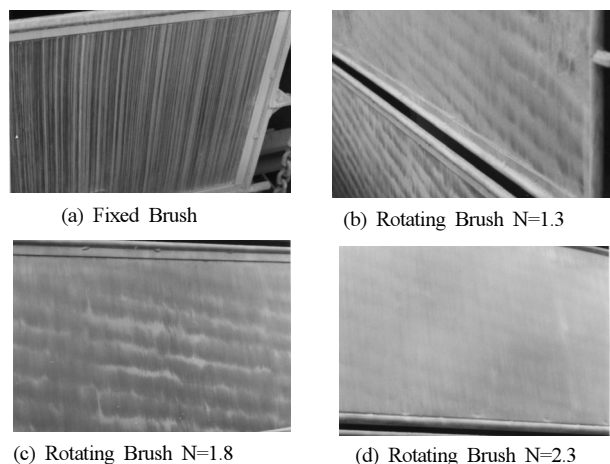


図 11 集塵極エレメントからのダスト払落し状況
Fig.11 Dust dislodging condition on collecting plate elements.

回転ブラシによる払落し回数Nを変化させてダストの払落し状況を検討した。回転ブラシの捕集ダストの払落し状況を図 11 (b)～(d)に示す。

ダスト払落し実験による集塵極エレメントの観察結果から、集塵極エレメントが移動する間に、捕集されたダストを回転ブラシで2回以上掻き落とすことで、集塵極エレメントからダストは一樣に払い落とせることがわかった。

集塵極エレメントのダスト払落し効果を確認するために、パイロット集塵装置でブラシに回転ブラシと固定ブラシを使用した場合について、FCC 触媒ダストを用いた集塵率の比較測定をおこなった。集塵率の測定結果を表 2 に示す。

回転ブラシを用いた場合の集塵率は 83 %であり、固定ブラシの場合の集塵率 78.1 %に比べて高い集塵率を示した。また荷電電圧も回転ブラシを用いたほうが固定ブラシよりも高くなっていった。これは固定ブラシのダスト払落し効果が不十分で部分的に逆コロナが発生しているためと考えられる。

回転ブラシは駆動装置が必要となり、固定ブラシに比較して構造が複雑になる欠点はあるが、ダストの払落し効果からみて回転ブラシが優れていると判断した。

5. まとめ

移動電極型電気集塵装置において、集塵板に静電捕集したダストの付着力と払落しについて実験検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

i) ダスト電気抵抗率の異なるダストを用いて付着力を測定した。ダストの付着力はダスト電気抵抗率が高くなると急激に増加する。ダスト電気抵抗率が $3.3 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ の FCC 触媒ダストは $8,400 \text{ N/m}^2$ と強い付着力を示し、集塵板の機械的

表 2 回転ブラシと固定ブラシにおける集塵率比較
Table 2 Effect of dislodging method by rotating and fixed brushes on the collection efficiency.

Brush		Rotating Brush	Fixed Brush
Gas Volume	(m^3/h)	2,730	2770
Gas Temperature	($^{\circ}\text{C}$)	193	194
Dust Resistivity	($\Omega \cdot \text{cm}$)	3×10^{14}	3×10^{14}
Inlet Dust Density	($\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)	0.106	0.114
Outlet Dust Density	($\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)	0.018	0.025
Collection Efficiency	(%)	83.0	78.1
Apply Voltage	(kV)	25.0	24.5
Discharge Current	(mA)	1.0	1.0

槌打では払落し困難なことがわかった。

ii) ダスト層厚さ $100 \mu\text{m}$ 以上で逆コロナの放電特性が顕著となるが、高抵抗ダストをブラシなどで払い落として集塵板表面を清浄に保てば、逆コロナを防止して高抵抗ダストの集塵が可能ながわかった。

iii) 高抵抗ダストの集塵板からの払落し方法を検討した結果、総合的に見て、固定ブラシよりも回転ブラシが集塵板に静電捕集したダストの払い落とし効果が優れていることがわかった。

参考文献

- 1) H.J. White: *Industrial Electrostatic Precipitation*, p.2, Addison-Wesley Publishing Co.(1963)
- 2) 静電気学会編: 静電気ハンドブック, p. 507, オーム社 (1981)
- 3) 木下康夫: 電気学会研究会資料 環境・安全研究会 ES-82-17 電気学会 (1982)
- 4) T. Tanaka, H. Fujishima, Y. Tsuchiya: Proc. Tenth Particulate Control Symposium and Fifth International Conf. on Electrostatic Precipitation, p.35-1 (1993)
- 5) D. Worachek, K. Duncan, R. Wright: Proc. Tenth Particulate Control Symposium and Fifth International Conf. on Electrostatic Precipitation, p.13-1 (1993)
- 6) J. Lynch, J. Lee: Proc. Tenth Particulate Control Symposium and Fifth International Conf. on Electrostatic Precipitation, p.16-1-16-27 (1993)
- 7) C.R. Lund, M. Selby, C. Cottingham: Proc. 7th ICESP, p550, ISESP (1998)
- 8) 松本靖二郎: 火力原子力発電, **38** (1987) 565
- 9) 立花直治: 静電気学会誌, **12** (1988) 433
- 10) 渡部輝雄, 亀島忠, 寺井寛: 火力原子力発電, **40** (1988) 155
- 11) 増田閃一, 文 在徳: 静電気学会誌, **6** (1982) 186
- 12) 青木功, 松山卓蔵: 静電気学会誌, **2** (1978) 207
- 13) 永山伝, 松田広行, 勝見裕: 電力中央研究所技術第 1 研究所報告 72035 (1972)
- 14) W.T. Sproull: J. APCA, **15** (1965) 50
- 15) 赤坂彰男, 越前谷定義, 三坂俊明: 電気学会講演論文集, p620 (1981)
- 16) 静電気学会編: 静電気ハンドブック, p. 263, オーム社 (1981)