

## 論 文

# 集じん極に堆積したダストの剥離について

青木 功\*, 松山 卓藏\*

(1977年11月30日受理)

## Removal of the Dust Deposited on the Collecting Electrodes

I. AOKI\* and T. MATSUYAMA\*

(Received November 30, 1977)

In the electrostatic precipitator (EP), the dust deposited on both collecting and discharge electrodes can reach point of serious impairment to collection efficiency. Therefore, it must be periodically removed to maintain a good performance. Usually, this is accomplished by high impact rapping, using acceleration at the electrode surface as high as 50 to 100 G's. But by this method, in case of high resistivity dusts as sulfur, it is impossible to keep the electrode clean even using 150 G acceleration. We attempted several methods to solve this problem, rapping, vibrating, air jet injection, wet scrubbers and so on. As results of various experiments, we selected the method to scrape directly the surface of the electrodes. The results are summarized as follow: 1) The scraper method can easily remove high resistivity dusts and tar substances when impact rapping is not effective to keep collecting electrodes clean. 2) By a periodical movement of scraper the efficiency of EP can be highly improved. The use of scraper proved to be quite satisfactory. We made a compact size EP by using scraper.

### 1. 緒 言

電気集じん装置（以下 EP と略す）において集じん極に捕集されたダストの堆積が過度になるとダストの再飛散、あるいは集じん極面の電位の上昇により集じん効率は低下する。また放電線にダストが付着すると誘電力による放電線肥大作用が急激に促進される。放電線が肥大するとコロナ開始電圧は上昇し、正常なコロナ放電が抑制され急激に集じん効率は低下する。したがって円滑な集じん作用を行なうには放電極、集じん極への付着、堆積ダストを再飛散させず電極から効率よく剥離回収し、常時最良の放電状態を保持する必要がある。従来 EP の研究はコロナ放電による集じん極への付着段階までの解析に重点がおかれてきたが、今後 EP の集じん効率と応用範囲を大きく左右すると思われる剥離技術の開発が急

務とされている。

筆者らは集じん極に堆積したダストの剥離方法として、現在最も一般的に用いられている槌打方式で槌打加速度と剥離率の関係を検討した<sup>1)</sup>。槌打剥離方式では硫黄のような高抵抗ダスト ( $\rho_d > 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ ) の場合 150 G ( $\times 9.8 \text{ m/s}^2$ ) という強い衝撃力を与えてもほとんど剥離できなかった。筆者らは槌打方式に代わる剥離方式として集じん極板を擦過するスクレーパ方式を検討した。スクレーパ方式ではダストの電気抵抗、堆積厚みに関係なく容易に剥離することができ、剥離効率 95% 以上で完全かつ均一に剥離できた。またそれぞれにスクレーパ清掃部を設置した小型 EP を 3 台直列化し、EP の小型、高性能化を検討した。スクレーパの周期的な作動により、集じん極に堆積したダスト厚みを極小一定に保ち、高効率に集じんでき良好な結果を得た。

### 2. 装置および方法

装置フローシートを図 1 に示す。含じん気流を流動層で発生させ、ファンにより装置本体に送入し、集じん部

\* 関西大学工学部化学工学科 (564 吹田市山手町 3-3-35)  
Department of Chemical Engineering, Faculty of  
Engineering, Kansai University, 3-3-35, Yamate-  
cho, Suita 564, Japan

表 1 集じん装置諸元  
Table 1 Design data of the experimental EPS.

諸元	I号機	II号機	III号機(単体)
集じん極	集じん板高さ [mm]	100	400
	集じん板厚さ [mm]	2	2
	ガス流方向長さ [mm]	100	250
	集じん板数 [plates]	1	14
	総集じん極面積 [m <sup>2</sup> ]	0.02	2.6
放電極	放電線ピッチ [mm]	20	16
	放電線径 [mm]	0.15	0.15
	ガス流方向数 [pieces]	4	12
集じん装置幅 [mm]	100	400	360
両極間距離 [mm]	20	15	15

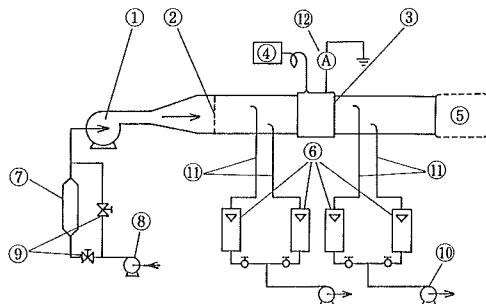


図 1 装置フローシート

①: ファン, ②: 整流器, ③: 集じん装置, ④: 高圧発生器,  
⑤: バグフィルタ, ⑥: 流量計, ⑦: 流動層, ⑧: プロワ,  
⑨: 調整弁, ⑩: 吸引ポンプ, ⑪: ダスト・サンプラー, ⑫: 電流計

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

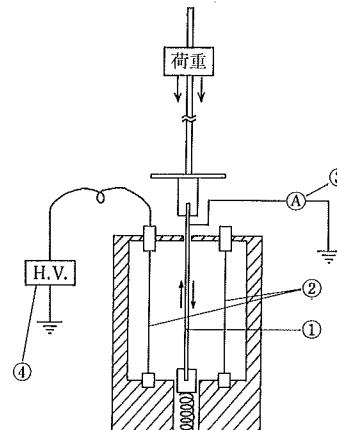


図 2 集じん装置詳細図 (I号機)

①: 集じん板, ②: 放電線, ③: 電流計, ④: 高圧発生器  
Fig. 2 Construction of EPS. (Type-1)

にて集じんした。含じん濃度の測定は集じん部前後において JIS Z-8808 で行ない、これより集じん効率を求めた。含じん濃度はバルブにより、ダクト内風速はファンの電圧をスライダックスで調整することにより所定の含じん濃度、風速を得た。試作 EP の諸元を表 1 に示す。

槌打剝離実験に用いた試作 I 号機(以下 I 号機と略す)の詳細を図 2 に示す。I 号機は放電線に  $0.15 \text{ mm} \phi$  のステンレス線を用い、20 mm 間隔で 8 本 2 列、集じん極板と 20 mm の放電間隙で対向させた。集じん極下部に直径  $8 \text{ mm} \phi$ 、巻数 15 のバネを 4 個取り付け集じん極板が上下運動できるようにした。集じん極の槌打はガス流方向に対し垂直方向より高さ 5~60cm の範囲で所定の荷重を落下させた。槌打加速度の測定は所定の測定場所に加速度変換器を順次取り付け、動的歪測定器(新興

通信工業 DS-6001 F) を用い、シンクロスコープに写し、写真撮影し解析した。槌打加速度は各測定点に対し 3~5 回測定しその平均値を用いた。なおダストの堆積量はあらかじめ集じん効率の経時変化を求めておき、所定の堆積量に要する時間集じんした。

スクレーパ実験に用いた試作 II 号機(以下 II 号機と略す)の詳細を図 3 に示す。II 号機は放電線に  $0.15 \text{ mm} \phi$  のステンレス線を 20 mm 間隔で 11 本を、集じん極板と 15 mm の放電間隙で対向させこれを並列させたものにスクレーパ清掃法を組み合わせたものである。スクレーパ部詳細を図 4 に示す。スクレーパ部はスクレーパに開閉機構を持たせるため電磁ソレノイドを設置した。スクレーパ部が下降の際は電磁ソレノイドを off にし、バ

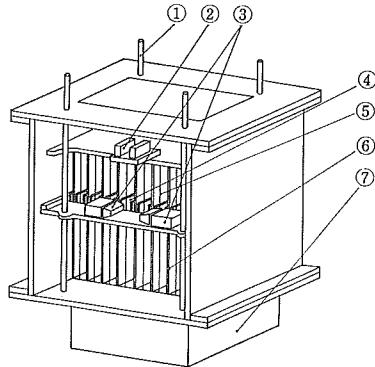


図 3 集じん装置詳細図（Ⅱ号機）

①：ガイド, ②：マイクロスイッチ, ③：ソレノイド, ④：  
スクレーパ, ⑤：放電極, ⑥：集じん極, ⑦：ホッパ

Fig. 3 Construction of EPS. (Type-2)

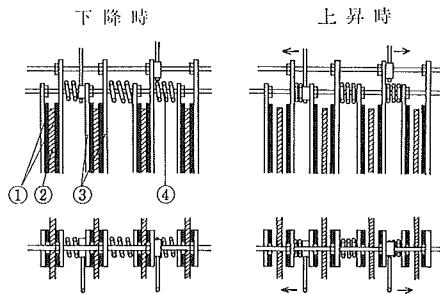


図 4 スクレーパ部詳細図（Ⅱ号機）

①：掻取り部, ②：集じん板, ③：スクレーパ, ④：圧着  
バネ

Fig. 4 Construction of scraper. (Type-2)

ネの力によりスクレーパを集じん極板に圧着させ堆積ダストを剥離した。しかしそくレーパ部が上昇の際は電磁ソレノイドの働きによりスクレーパは開き、集じん極板と一定の間隔を保ちながら上昇し、スクレーパ上部にダストが堆積しないようにした。スクレーパ部は電気的に制御し、その回路を図5に示す。なおスクレーパ作動の際は集じんを休止した。またスクレーパ清掃を周期的に行なうことにより処理量の増大をはかり EP の小型化、高性能化を試作Ⅲ号機（以下Ⅲ号機と略す）で検討した。

Ⅲ号機の詳細を図6に示す。Ⅲ号機はⅡ号機とほぼ同じ容量で、それぞれにスクレーパ清掃部を設置した小型EPを3台直列化したものであるが、スクレーパ開閉機構はない。しかしⅡ号機と異なり、スクレーパ清掃の際、放電を休止せることなく連続的に集じんできるようにした。電気回路図を図7に示す。なおⅡ号機、Ⅲ号機とも放電線剥離は行なわず、集じん極板のみ剥離した。実験は風速 1 m/s, 含じん濃度 1 g/Nm<sup>3</sup>, 印加電圧は④

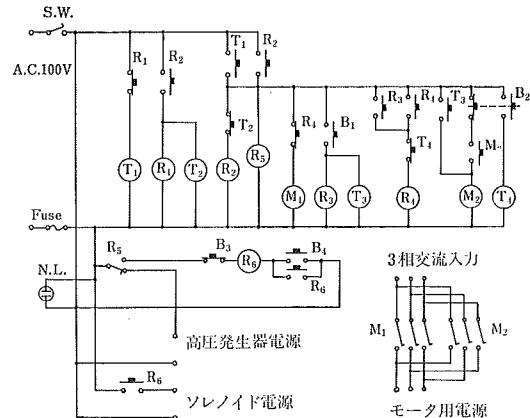


図 5 スクレーパ制御回路（Ⅱ号機）

R<sub>1</sub>～R<sub>6</sub>：リレー  
T<sub>1</sub>～T<sub>4</sub>：タイマ  
M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>：マグネットスイッチ  
B<sub>1</sub>～B<sub>4</sub>：マイクロスイッチ  
T<sub>1</sub>：集じん時間制御  
T<sub>2</sub>：スクレーパ可動時間制御  
T<sub>3</sub>：下部停止時間制御  
T<sub>4</sub>：上部停止時間制御

Fig. 5 Electric circuit of scraper drive. (Type-2)

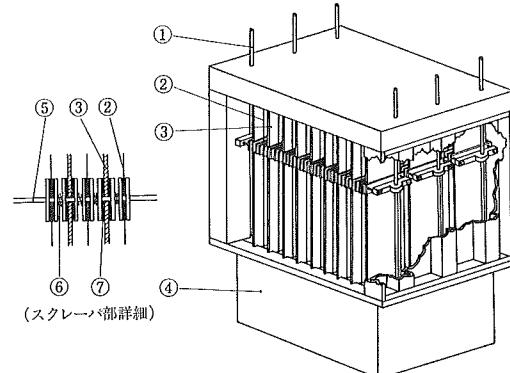


図 6 集じん装置詳細図（Ⅲ号機）

①：ガイド, ②：放電線, ③：集じん板, ④：ホッパ,  
⑤：スクレーパ連結棒, ⑥：圧着バネ, ⑦：掻取り部

Fig. 6 Construction of EPS. (Type-3)

6 kV で行なった。使用したダストの物性を表2に示す。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 槌打方式による剥離について

##### 3.1.1 槌打加速度について

荷重および槌打高さによる槌打加速度の関係を、図8に示す。集じん極板を9個の等断面積に分け、その中心部を加速度測定位置とし、その平均値を荷重、槌打高さによる槌打加速度とした。荷重および槌打高さによる槌

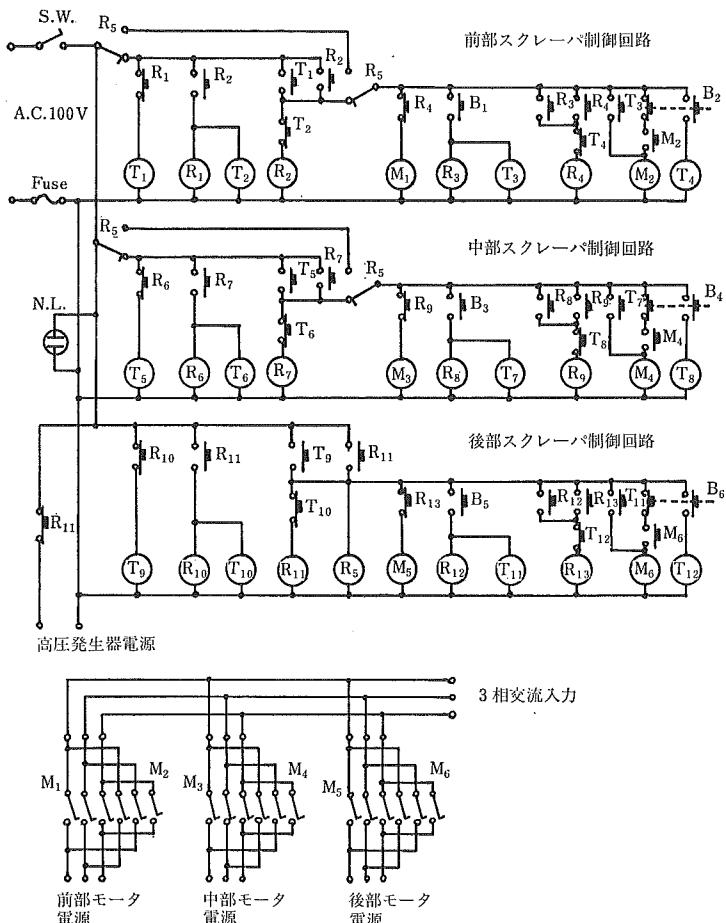


図 7 スクレーパ制御回路 (III号機)

R<sub>1</sub>~R<sub>13</sub>: リレー  
 T<sub>1</sub>~T<sub>12</sub>: タイマー  
 M<sub>1</sub>~M<sub>6</sub>: マグネットスイッチ  
 B<sub>1</sub>~B<sub>6</sub>: マイクロスイッチ  
 T<sub>1</sub>, T<sub>5</sub>, T<sub>9</sub>: 集じん時間制御  
 T<sub>2</sub>, T<sub>6</sub>, T<sub>10</sub>: スクレーパ可動時間制御  
 T<sub>3</sub>, T<sub>7</sub>, T<sub>11</sub>: 下部停止時間制御  
 T<sub>4</sub>, T<sub>8</sub>, T<sub>12</sub>: 上部停止時間制御

Fig. 7 Electric circuit of scraper drive. (Type-3)

打加速度は原点を通る直線関係が得られ良好な結果を得た。

### 3.1.2 剥離効果について

EP で集じん極に堆積したダストの付着力は、粒子間および粒子と集じん極間に働く Van der Waals 力と静電付着力がある。Penny らはフライアッシュを用い静電気力により付着させたダストと機械的に圧縮させたダストの付着力を比較検討した結果、前者のほうが後者より約 35 倍大きいことを報告している<sup>2)</sup>。したがって EPにおいては Van der Waals 力に比べ静電付着力のほうが支配的であると考えられる。EP でのダスト静電付着力については

$$Pel = d^2(kEj\rho_d - E^2/32)$$

表 2 粉じんの物性  
Table 2 Characteristics of dust samples.

名 称	電気抵抗 [Ω·cm]	嵩密度 [g/cm <sup>3</sup> ]
タルク	10 <sup>9</sup> ~ 10 <sup>10</sup>	0.94
硫黄	10 <sup>12</sup> ~ 10 <sup>14</sup>	0.88
カーボンブラック	10 <sup>3</sup> ~ 10 <sup>4</sup>	0.41
セメント	10 <sup>9</sup> ~ 10 <sup>10</sup>	1.35
フライアッシュ	10 <sup>7</sup> ~ 10 <sup>8</sup>	1.22

なる関係があり、右辺第 1 項はイオン電流によるクーロン力で、第 2 項はイオン電気反発力である<sup>3)</sup>。したがって電気付着力はダストの電気抵抗に関係がある。高抵抗

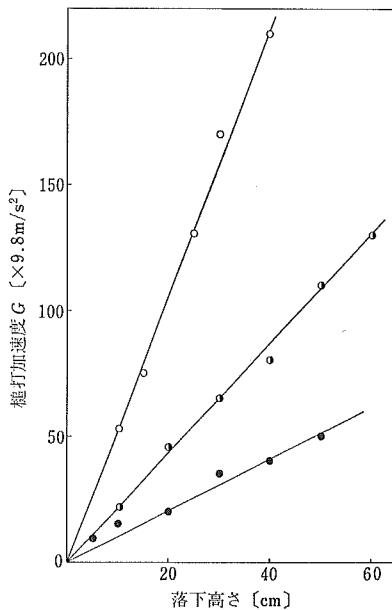


図 8 落下高さと槌打加速度の関係

Key 荷重 [g]  
 ○ 175  
 □ 90  
 ● 45

Fig. 8 Measured acceleration in multiples of "G" vs. falling height.

ダストでは付着力が大きく、さらに Jahnsen-Rahebeck 効果という粉体に静電気が帯電したときの特異現象があるため付着力は異常に強い。逆に高導電性ダスト ( $\rho_d < 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ ) ではダストの付着力が弱く、反発力のため再飛散しやすい。一般に、槌打の際の衝撃力は重力加速度  $G (\times 9.8 \text{ m/s}^2)$  の何倍という表現で表わされ、10 ~ 30G では剥離容易なダスト、100G 程度が一般で、200G 以上では付着強固なダストである。槌打加速度と剥離効率の関係を図 9 に示す。

堆積量はカーボンブラックのみ  $0.1 \text{ kg/m}^2$  で、他のダストは  $0.3 \text{ kg/m}^2$  で行なった。フライアッシュ、セメント、タルクについては槌打加速度が大きくなるほど、剥離率は高くなる。100G 程度で 90% 以上剥離できた。堆積量と剥離率の関係を図 10 に示す。槌打加速度の場合と同様堆積量が多くなるほど、剥離率も上昇し、 $0.3 \text{ kg/m}^2$  で 90% 以上剥離できた。加電の場合は無加電時に比べ剥離率は悪くなるが、無加電時とほぼ同じ傾向を示した。しかし硫黄の場合、加電、無加電にかかわらず槌打加速度を大きくしても、堆積量を増大させてもほとんど剥離できなかった。高抵抗ダストの場合、付着というより粘着しているという表現が適切であり、槌打方式では完全に剥離することは不可能であった。

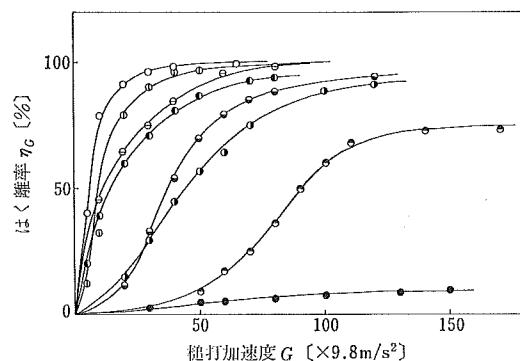


図 9 槌打加速度と剥離率の関係

温度: 25°C, 濕度: 55% RH

Key	試 料	堆積量 [kg/m²]	印加電圧 [kV]
○	フライアッシュ	0.3	0
①	フライアッシュ	0.3	+8
○	カーボンブラック	0.1	0
①	セメント	0.3	0
①	セメント	0.3	+8
●	タルク	0.3	0
○	タルク	0.3	+8
●	硫黄	0.3	0, +8

Fig. 9 Removal efficiency of rapping for various precipitated dust layers as a function of acceleration.

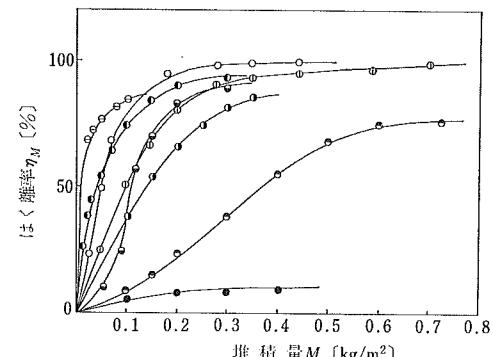


図 10 堆積量と剥離率の関係

温度: 25°C, 濕度: 55% RH

Key	試 料	槌打加速度 $G [\times 9.8 \text{ m/s}^2]$	印加電圧 [kV]
○	フライアッシュ	30	0
①	フライアッシュ	30	+8
○	カーボンブラック	40	0
①	セメント	80	0
①	セメント	80	+8
●	タルク	80	0
○	タルク	80	+8
●	硫黄	160	0, +8

Fig. 10 Removal efficiency of rapping for various acceleration as a function of precipitated dust quantity.

フライアッシュ、セメント、タルクの実験結果を永山らと同様、対数確率紙で検討した<sup>4)</sup>。槌打加速度と剥離率の関係を図 11 に、堆積量と剥離率の関係を図 12 に

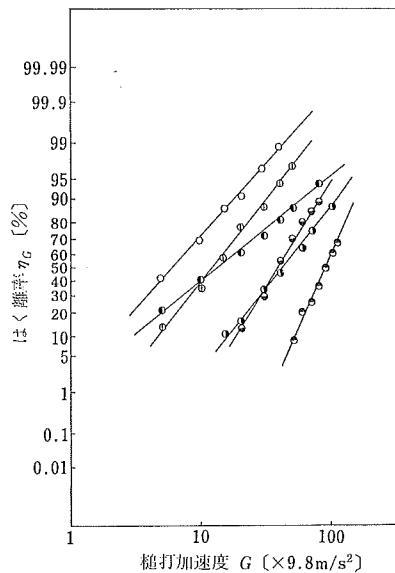


図 11 横打加速度と剝離率の関係

Key	試料	印加電圧 [kV]	堆積量 [kg/m <sup>2</sup> ]
○	フライアッシュ	0	0.3
①	フライアッシュ	+8	0.3
●	セメント	0	0.3
◐	セメント	+8	0.3
■	タルク	0	0.3
◑	タルク	+8	0.3

Fig. 11 Removal efficiency of rapping for various precipitated dust layers as a function of acceleration. (log-normal plot)

示す。双方とも 20~80% 範囲で良好な相関関係を認めた。いま 0~100% まで直線関係が得られたとすると、横打加速度および堆積量と剝離率の関係は、

$$\eta_G = 100 \int_0^G \frac{1}{\log \sigma_g \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ \frac{-(\log G - \log G_{50})^2}{2(\log \sigma_g)^2} \right\} \times d(\log G)$$

$$\eta_M = 100 \int_0^M \frac{1}{\log \sigma_m \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ \frac{-(\log M - \log M_{50})^2}{2(\log \sigma_m)^2} \right\} \times d(\log M)$$

で表わすことができた。いま式中のフライアッシュ、セメント、タルクの  $\sigma_g$ 、 $\sigma_m$  を求めるとフライアッシュの場合、加電で  $\sigma_g=2.4$ 、 $\sigma_m=2.3$ 、無加電で  $\sigma_g=2.0$ 、 $\sigma_m=2.2$  となった。セメントの場合、加電で  $\sigma_g=2.2$ 、 $\sigma_m=2.4$ 、無加電で  $\sigma_g=3.7$ 、 $\sigma_m=3.5$  となった。タルクの場合、加電で  $\sigma_g=1.8$ 、 $\sigma_m=2.1$ 、無加電で  $\sigma_g=1.8$ 、 $\sigma_m=1.8$  となりほぼ一致した。したがって横打加速度時におけるダスト堆積量とその剝離率を測定すれば、他の堆積時の剝離率が推算できる。またダスト堆積量における横打加速度とその剝離率を測定すれば、他の横打加速度時の剝離率を推算することができる。

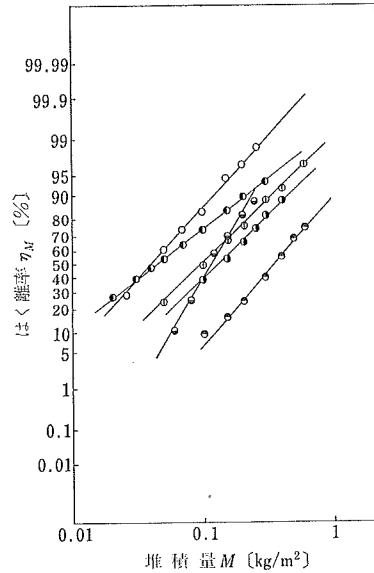


図 12 堆積量と剝離率の関係

Key	試料	印加電圧 [kV]	横打加速度 [ $\times 9.8 \text{ m/s}^2$ ]
○	フライアッシュ	0	30
①	フライアッシュ	+8	30
●	セメント	0	80
◐	セメント	+8	80
■	タルク	0	80
◑	タルク	+8	80

Fig. 12 Removal efficiency of rapping for various acceleration as a function of precipitated dust quantity. (log-normal plot)

### 3.2 スクレーパ方式による剝離について

#### 3.2.1 スクレーパ方式による剝離効果

硫黄のような高抵抗ダストはダストの誘電性のため付着力が異常に強く、従来の横打方式では極端に強い衝撃力を与えても剝離不十分である。高抵抗ダストの場合少しでも集じん極にダストが堆積すると放電电流は異常に増し逆電離の原因となる<sup>5)</sup>。したがって完全に剝離する必要がある。筆者らは新しい剝離装置を開発するに当たり、(1) 驚音公害を招かぬこと、(2) 集じん極においてシート状、フレーク状のまま剝離し、再飛散の少ない構造とすること、(3) 最良の剝離間隔を得るため、剝離周期の調節が容易なこと、などを考慮して集じん極板を擦過するスクレーパ方式を検討した。

スクレーパ方式での剝離効果を図 13 に示す。硫黄の場合でも容易にかつ均一に剝離できた。スクレーパ清掃を行なうことにより集じん効率は集じん初期の状態に回復できた。硫黄の剝離状態を図 14 に示す。タルクの場合、自重、風圧により容易に再飛散を起こす。しかし再飛散した粒子はすぐ電荷を帯び集じんされる。本実験では 4.5 時間経過しても集じん効率 90% 以上であったた

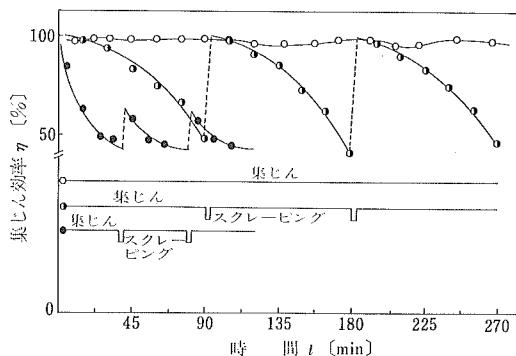


図 13 集じん効率の経時変化

風速 1 m/s, 温度 25°C

濃度 1 g/Nm<sup>3</sup>, 湿度 55%RH

Key 試 料

○ タルク

● 硫黄

■ カーボンブラック

Fig. 13 Time change of collection efficiency at intermittent scraping of collecting electrodes. (Type-2)

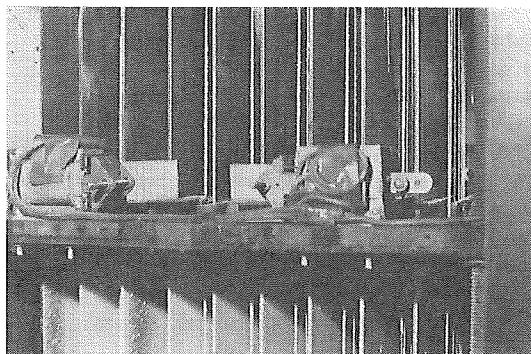


図 14 スクレーパ清掃効果 (sample: 硫黄)

Fig. 14 Picture showing the effect of scraping.

め剥離実験は行なわなかった。しかし槌打方式で述べたように硫黄に比べタルクの付着力は弱いため剥離は容易である。通常タルクのような中間抵抗ダスト ( $10^4 < \rho_d < 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ ) では完全に剥離を行なわず集じん極上にダスト厚み 1~5 mm ぐらい残留させておく。これは集じん極板をあまりきれいに清掃しておくと、付着力が弱いため再飛散を起こしやすいためである。

スクレーパ方式ではスクレーパと集じん極板の間隔を調整することにより、均一に、一定のダスト層厚みを容易に集じん極板に残留させておくことができる。カーボンブラックの場合はスクレーパ清掃を行なっても集じん効率は集じん初期の状態まで回復しえなかった。これは放電極清掃を行なわなかったためと考えられる。高導電性ダストの場合集じん効率の低下は放電線肥大、また集

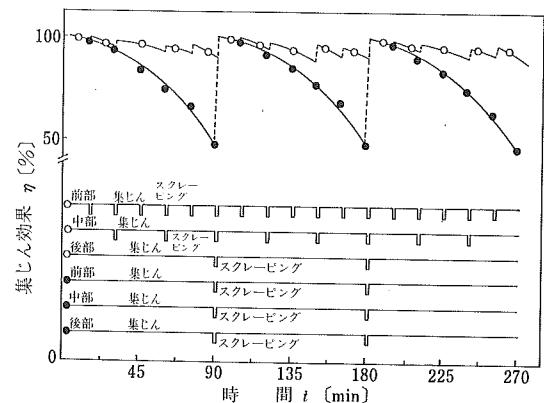


図 15 集じん効率の経時変化

試料: 硫黄, 風速 1 m/s, 温度 25°C, 濃度 1 g/Nm<sup>3</sup>, 湿度 55%RH

Fig. 15 Time change of collection efficiency at periodical scraping. (Type-3)

じん極上のダストの堆積により電流漏洩が起こり正常なコロナ放電を阻害するなどの原因によるものと思われる<sup>6)</sup>。したがって高導電性ダストの場合は放電極清掃が必要であることを強調しておく。以上のようにスクレーパ方式ではダストの電気抵抗、堆積厚みに関係なく有効に剥離できた。したがって集じん極板に堆積したダスト厚みは極小一定に保たれるため高効率に集じんできた。

### 3.3 EP の小型、高性能化について

一般に EP で高抵抗ダストを処理する場合、(1) ダストの電気抵抗を EP の最も適した  $10^5 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$  にするため水分または  $\text{SO}_3$  などの物質を添加する、(2) 装置を大型化する、などの対策がなされている。しかし(1)の方法では装置を腐食させる、(2)の方法では建設費、維持費が高くなる欠点がある。筆者らはスクレーパ清掃部を設置した小型 EP を数台直列化し、順次周期的にスクレーパ清掃を行なうことで EP の小型、高性能化をはかった。III号機の集じん効率を図 15 に示す。III号機の集じん効率は経時に低下し 90 分で約 45% と低下した。しかしスクレーパ清掃を前部 15 分、中部 30 分、後部 90 分周期で行なうことにより集じん効率は常に 95% 以上を維持した。したがって処理量を増大することができ、EP の小型、高性能化が可能となった。

### 4. 結 言

(1) 従来の槌打剥離法では、剥離困難とされていた高抵抗ダスト、タルク状物質でもスクレーパ方式では容易に剥離でき、有効であることを認めた。

(2) スクレーパ法を設置した小型 EP を数台直列化し、スクレーパ清掃を行なうことにより、処理量

が増大でき EP の小型、高性能化ができた。

本研究の実験にあたり、協力された中本雅友君、上品哲彦君、河野興志博君、伊藤和博君に謝意を表わす。

### 記 号

$d$ : 粒 径	[cm]
$E$ : 電界強度	[esu/cm]
$G$ : 重力加速度	[ $\times 9.8 \text{ m/s}^2$ ]
$G_{50}$ : 剥離率 50% における加速度	[ $\times 9.8 \text{ m/s}^2$ ]
$j$ : 電流密度	[esu/cm]
$k$ : 定 数	[—]
$M$ : ダスト堆積量	[kg/m <sup>2</sup> ]
$M_{50}$ : 剥離率 50% におけるダスト堆積量	[kg/m <sup>2</sup> ]
$Pel$ : 付 着 力	[dyne]
$\log \sigma_g$ : 対数幾何標準偏差	[—]

$\log \sigma_m$ : 対数幾何標準偏差	[—]
$\sigma_d$ : ダスト電気抵抗	[ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]
$\eta_G$ : ダスト堆積量一定での槌打加速度を変化させた場合の剥離率	[%]
$\eta_M$ : 槌打加速度一定でのダスト堆積量を変化させた場合の剥離率	[%]

### 参 考 文 献

- 1) W.H. Sproul : JAPCA, 15, 2 (1965), 55.
- 2) G.W. Penney and E.H. Klinger : AIEE Trans., 81, 7 (1962), 200.
- 3) H.T. Lowe and P.H. Lucas : Br. J. Appl. Phys., 24, 2 (1953), 40.
- 4) 永山 伝, 松田広行, 勝見 裕 : 電力中央研究所技術第一研究所報告, 72037 (1972).
- 5) H.J. White : JAPCA, 24, 4 (1974), 315.
- 6) 青木 功, 松山卓蔵 : 粉体工学研究会会誌, 14, 5 (1977), 265.