

論 文

複数の誘導帯電電極を用いたフライアッシュの静電選別

東山禎夫*, 梅津勇**, 浅野和俊*

(1990年1月19日受理)

Electrostatic Separation of Fly Ash Using Multi-induction Electrodes

Y. HIGASHIYAMA, * I. UMETSU, ** and K. ASANO*

(Received January 19, 1990)

Removal of unburned carbon contained in fly ash is useful to promote the effective use of fly ash as construction materials. Electrostatic separation based on induction charging has been investigated to separate conductive carbon and dielectric ash material from fly ash experimentally. The rotor-type separator fabricated on the experimental basis consists of a rotating drum and multi-induction electrodes whose number and configuration aim at the increase of the electric field strength on the drum surface and the control of the behavior of individual ash particles. The performance of the separator depending on electrode configuration was evaluated with carbon content in fly ash and weight fraction collected into the defined section. Experimental results showed that the carbon content in fly ash separated was decreased as the number of electrode was increased, while the weight fraction was also decreased. There is a trade-off relation between carbon content and the amount of weight fraction and so there should exist the appropriate number of the induction electrodes and configuration. The performance of the single-stage separation with four electrodes was superior to that of the multi-stage separation with single electrode. It became also clear that the distribution of particle size affects the performance of separation significantly.

1. まえがき

石炭焚き火力発電所では多量の石炭灰を排出し、1986年度実績では排出した381万tのうち54%が陸、海の埋立てに処分され、残り46%がセメント材料、コンクリート混合など有効利用に供されている¹⁾。近年、我が国では安定した電力供給を確保するため、石油依存度を低減し、原子力、石炭火力、LNGなどの石油代替電源の開発が積極的に進められている。これらの中でも石炭火力による電源構成の割合を1986年度末の7.4%(11.7GW)から1995年度末9%(18GW)、2000年度末の11%(23GW)まで増加させることが目標とされている²⁾。このような状況の中で、環境に排出される石炭灰は継続的に増加し続けるので、地球資源の回収、再利用という観点から石炭灰の有効利用の促進、新しい利用方法の開発を進めるることは必要であり、いろいろな利

キーワード：静電選別、誘導帶電、フライアッシュ、未燃カーボン

* 山形大学工学部電気工学科 (992 山形県米沢市城南 4-3-16)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Yamagata University, 3-16, Jonan 4-chome, Yonezawa, 992 Japan

** 現在 山形県工業技術センター

用形態が検討されている³⁾。JISでは石炭灰のうち未燃カーボン含有量が5%未満のものをフライアッシュと定義し⁴⁾、セメント混和材として利用可能であるとしている⁵⁾。したがって、有効利用を促進する一つの方法としては火力発電所から排出された石炭灰中の未燃カーボンを取り除くことがあげられる。電気集塵装置で回収される石炭灰は一般に細粉および粗粉に分けられるが、ここでは細粉をフライアッシュと呼ぶ。本研究ではフライアッシュ中のカーボン含有量を低くすることを目的として静電選別^{6,7)}に着目した。

静電選別は物理的性質の異なる二種以上の微粒子が混合されている粉体を帶電させ、粒子を電界の力を利用して運動させることにより、物性値の違いに起因する運動量の違いから選別するものである。フライアッシュ中のカーボンとその他の灰分とで大きく異なる物性値の一つは導電率である⁸⁾。粒子の帶電方法として誘導帶電を用いた場合、粒子の帶電量は導電率に大きく依存することになる。すなわちカーボンのように導電率の大きい粒子は短時間で帶電するのに対して、灰分の主体であるSiO₂のように導電率の小さいものは長時間を要する。したがって、一定時間内に帶電させる装置を用いれば、粒子のもつ帶電量に大きな違いが生じ、電界中で粒子に動く静

電気力に差が生じて選別されることになる。

本研究では選別装置として回転ドラム方式を採用した。回転ドラム型選別装置は高圧電極に対置する接地回転ドラム上に粉体を供給して、両電極間の電界を利用して粒子の帯電および運動を制御するものである。高圧電極を1本用いた場合のフライアッシュの選別特性に及ぼす電極電圧、電極間距離、ドラム回転速度の影響を調べ、フライアッシュ中のカーボン含有率を容易に5%以下にできることを示した⁹⁻¹²。誘導帶電を用いる装置では、回転ドラム上に粉体を一層だけ一様に乗せることが重要であるが、多量の粉体を処理するという観点からは現実的ではない。そのため粉体をより長く高電界下に曝すことにより帶電の機会を増やすことが必要であると考えられる。

本研究では複数の円筒電極を回転ドラムの周囲に配置して、誘導帶電のための外部電界の強さを大きくして帶電電荷量を増加させることと、外部電界分布を空間的に変化させることによって、帶電粒子の運動に影響を与え、より効果的な選別特性を得られるようにした。実験は主として誘導帶電電極の数を変化させることにより、回収されるフライアッシュ中のカーボン含有率および粉体回収率に及ぼす影響を調べた。また、回転ドラム周囲の電界の強さを数値計算により求め、選別特性に及ぼす電界の強さの効果の定性的な助けとした。さらに、選別されたフライアッシュの粒度分布を調べ、粒子径の点から選別特性に対する検討を行った。

2. 実験方法

2.1 選別装置

回転ドラムの周間に9本の誘導帶電電極を配置した選別装置を図1に示す。回転ドラムは直径200mm、長さ500mmの円筒で回転数は34~95 rpmの範囲で変えることができる。高電圧を印加する誘導帶電電極は回転ドラム表面から20mmの距離を離して同心状に配置した。誘導帶電電極は最大9本まで取り付けることができ、隣合う電極は回転ドラム中心から $\pi/12$ の角度で配置されている。粉体が回転ドラム上にできるだけ均一に乗るように、ホッパからバイブレータによる振動によりいったんベルトコンベアに落としてからドラム上へ搬送した。

帶電した粉体は電界、重力、遠心力などの力により回転ドラムから飛び出し、一方、帶電量の少ない粉体は回転ドラムに付着した状態で運ばれ、背後のブラシにより掻き落とされる。本装置ではアクリル樹脂製の仕切り板を用いて5つの粉体回収溝を設定した。したがって、図1における回収溝#1, #2にはドラムを飛び出したカーボンの多い粉体が回収され、溝#5にはカーボンの少な

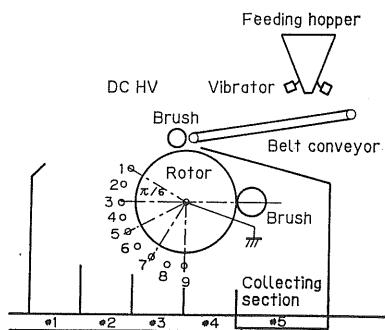


図1 複数の帶電電極を有する回転ドラム型選別装置

Fig. 1 Schematic diagram of a rotor-type electrostatic separator with multi-charging electrode.

い粉体が回収されることになる。なお、装置からの粉体の飛散を防ぐために装置全体をアクリル樹脂板で囲んである。

2.2 方 法

通常の鉱物資源の選別に際しては1回の選別操作で目的とする濃度の物質が抽出されることは少なく、選別操作を連続して繰返すことにより所定の濃度を達成している。これが多段選別である。本実験では一段選別を主体としたが、模擬的な多段選別も行った。使用したフライアッシュは東北地方のある火力発電所から排出された細粉でカーボン含有率は7.7%である。一段選別では0.5kg、多段選別では2kgのフライアッシュを使用した。粉体供給速度は便宜上、ホッパに入れた粉体量を全粉体が落下に要した時間で除することにより求めた。

選別特性は各溝に選別されるフライアッシュ粉体の量と粉体中のカーボン含有率で表すことができる。粉体選別収率は選別に使用した粉体総重量に対する各溝に落下した粉体の重量の割合で表した。粉体中のカーボン含有量(強熱減量)は以下のように燃焼法⁴⁾により求め、重量比で示した。まず、選別された粉体の0.3~0.5gをつぼに入れ、恒温槽中で110°Cに保って2時間加熱することにより水分を取り除く。その後、電気炉の中で800°Cに加熱し、2時間燃焼させた。燃焼前後の重量を直示天秤で0.1mgの桁まで読み取り、それらの差から粉体中のカーボン含有量を算出した。燃焼試料の量が少ないとによる測定誤差を考慮して、同一粉体について燃焼試料を2個用意し、両者の平均値をその粉体のカーボン含有率とした。

選別特性は単位時間当たりの粉体の供給量、回転ドラムの速度、高圧電極とドラム間の距離、印加電圧などによって大きく影響を受ける。粉体供給量および回転ドラムの表面速度は、予備実験の結果から、それぞれ2.5g/s

表 1 誘導帶電電極の配置

Table 1 Arrangement of induction electrodes.

Configuration of electrode	Electrode number (refer to Fig. 1)							
1	3							
4A	2	4	6	8				
4B		3	5	7	8			
5		3	4	5	6	7		
6		3	4	5	6	7	8	
7		3	4	5	6	7	8	9
9	1	2	3	4	5	6	7	8
								9

および 500 mm/s に設定した。誘導帶電電極へは負極性で、35 kV 以下の電圧を印加した。粉体を供給しなければ電極間に火花放電が生じない電圧である。

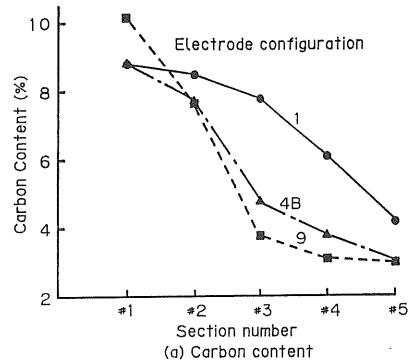
本実験の主な目的は選別特性に及ぼす誘導電極の配置の効果を明らかにすることにあり、誘導電極の配置について表 1 に示す条件で検討を行った。電極数 4 本の場合には 2 通りの配置を設定した。なお、各溝に回収される粉体のカーボン含有率、選別収率は実験を行う日の特に湿度などの気象条件によって、若干異なるため、電極配置を変える場合など、比較対象となる配置については同じ実験日のデータで比較した。

3. 選別特性

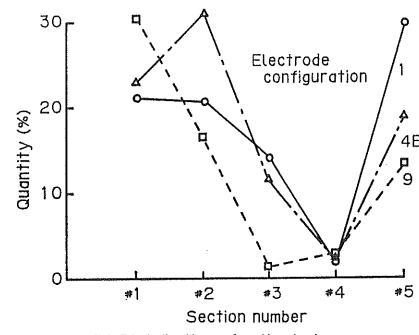
3.1 一段選別

電極数を 1, 4, および 9 本に設定した場合について、各回収溝ごとの粉体回収量およびカーボン含有率を図 2 に示した。表 1 に示したように、電極数が 1 本の場合の使用電極番号は No. 3 であり、4 本の場合は配置 4B の No. 3, 5, 7, および 8 である。図(a)に示すように、回収粉体中のカーボン含有率は溝の位置により大きく異なり、溝 #5 に入る粉体のカーボン含有率が最も低くなっている。カーボン粒子がフライアッシュから取り除かれていくことが明確に示されている。

電極数の違いによって粉体がドラムから飛び出す状況は大きく異なるようである。帶電電極が 1 本の場合、溝 #1~#3 に回収される粉体のカーボン含有率は 8~9% でほぼ等しく、#4 で 6%, #5 で 4% と順に低くなる。電極が 4 本および 9 本の場合、各溝のカーボン含有率は両者でほぼ等しく、溝 #5 のカーボン含有率は約 3% に低下している。注目すべきことは溝 #2 と #3 の間でカーボン含有率の違いが大きくなっていることである。溝 #3 は図 1 からも明らかなように帶電電極 No. 7, 8, 9 の直下にある。溝 #1, #2 で大部分のカーボンが取り除かれ、飛び出せずにドラム上に残った粉体がこれらの電極



(a) Carbon content



(b) Distribution of collected mass

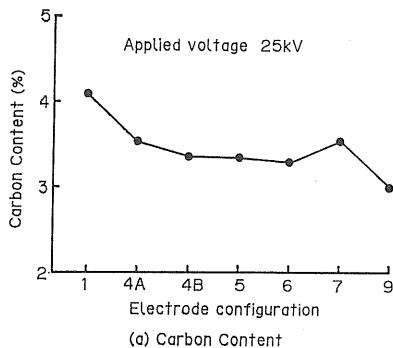
図 2 選別されたフライアッシュの特性

Fig. 2 The properties of fly ash in each collecting section for the different number of induction electrode.

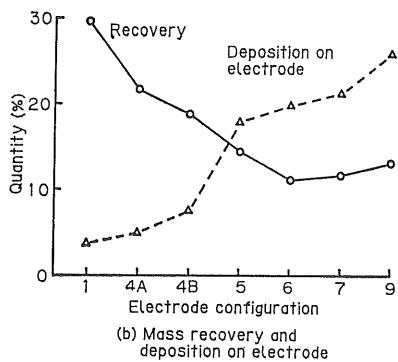
の影響を受けて、飛び出してきたものと推定できる。

粉体選別収率に及ぼす電極配置の効果は図(b)に示した特性に顕著に現れている。カーボン含有率の低い #5 に入る粉体量について注目すると、電極 1 本の場合には粉体選別収率は約 30% であったものが、4 本、9 本と増えるにしたがい、19%，13% と低下する。これに対して溝 #1, #2 においては、電極 1 本ではほぼ同量が回収されており、2 つの溝を合わせて 45% の粉体が回収される。一方、電極 4 本の場合、溝 #1 よりも #2 の方に多くの粉体が入り、溝 #1, #2 合わせて 55% が回収されている。電極 9 本では #1 に 30% 以上が入り、溝 #3 で回収される粉体はわずか 2% にすぎない。

電極への印加電圧を 25 kV 一定にし、帶電電極の数を増やしたとき、溝 #5 に回収される粉体および電極に付着する粉体量の変化をまとめたものが図 3 である。電極数が 1 本から 4 本に増加するとカーボン含有率は低下するが、さらに増加しても 4 本から 7 本の間ではほとんど変わらない。選別収率は電極数の増加と共に減少し、6 本以上では変化がない。また、電極数が増えるにつれて、電極に付着する粉体量が増加し、電極 9 本では 25%



(a) Carbon Content



(b) Mass recovery and deposition on electrode

図3 選別特性に及ぼす誘導帯電電極数の効果

Fig. 3 Influence of the number of induction electrode on the separator performance.

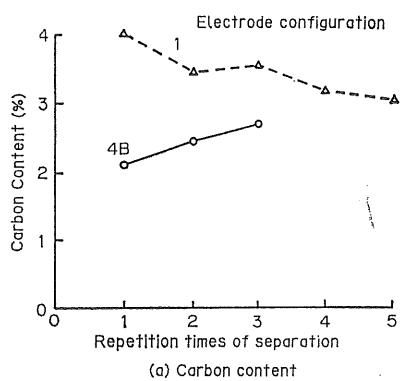
に達する。

フライアッシュの選別では、カーボン含有率の低い粉体をできるだけ多く回収することが望ましい。しかしながら、カーボン含有率を下げようとすると選別収率が下がり、両者の間にはトレードオフの関係が生じている。実用上は経済的な選別効果を考慮する必要があるが、本装置においては電極数は4本で、電極間隔の広い4B配置のものが適当であると考えられる。

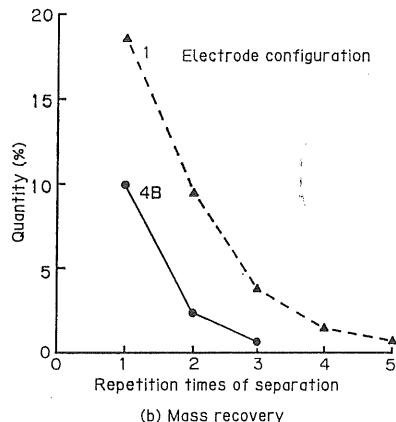
3.2 多段選別

2 kg のフライアッシュを用いて選別実験を行い、溝#5に回収された粉体を再度ホッパーに戻し、選別を3~5回繰り返した。溝#5に回収された粉体のカーボン含有率と粉体量を図4に示した。粉体の回収割合は最初の選別で使用した2 kgを基準にしている。電極1本の場合、選別を繰り返すことにより、カーボン量は減少し、多段選別が有効であることを示している。しかしながら溝#5への粉体回収量は急激に減少し、5回目の選別の後では選別前重量の1%程度が回収された。

これに対して、電極4本の場合には、1回の選別でカーボン含有率は約2%と低くなってしまっており、回収率も10%である。選別を繰り返すごとに選別収率は低くなり、カ



(a) Carbon content



(b) Mass recovery

図4 多段選別されたフライアッシュの特性

Fig. 4 Carbon content and powder collecting yield of fly ash separated by multi-stage separation.

ーボン含有率は増加傾向を示している。このことは電極4本の場合には多段選別を行うことは無意味であることを示している。印加電圧はそれぞれの電極数に対して必ずしも最適に設定されてはいないので、カーボン含有率の値など両者の比較を公平に行なうことは困難であるが、複数の帶電電極を用いることにより、電極1本の多段選別に匹敵するかそれ以上の選別効果を期待できることが明らかになった。

4. 検討

4.1 ドラム表面の電界の強さ

帶電電極の数を変えた場合、選別特性に大きな違いがみられた。粉体の帶電量およびその動きに影響を与えるのは回転ドラム表面電界および帶電電極周辺の電界の強さである。帶電電極の配置が回転ドラム表面の電界の強さに与える影響を評価するために、電荷重畳法を用いて電界計算を行った。帶電電極およびドラムをそれぞれ8本および16本の無限長線電荷で表した。アクリル樹脂

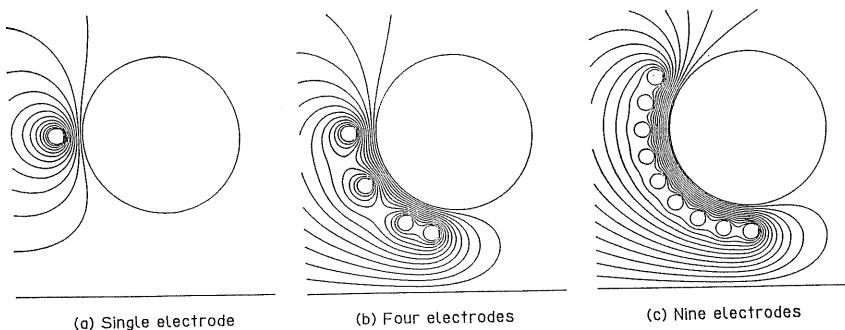


図 5 電荷重畠法により求めた選別空間近傍の等電位線

Fig. 5 Equipotential lines around the separator calculated by the charge simulation method.

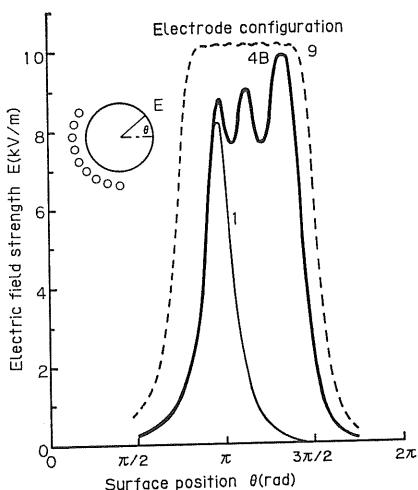


図 6 回転ドラム表面の電界の強さ

Fig. 6 The electric field strength on the rotor surface for the different electrode configuration.

製の仕切り板は考慮していない。

電極配置 1, 4B, および 9 に対する等電位面を図 5, 印加電圧 25 kV の場合のドラム表面の電界の強さを図 6 に示す。電極 1 本の場合、ドラムと帯電電極との間の狭い領域だけが比較的高い電界領域になっているのに対して、電極が 4 本および 9 本の場合には、帯電電極に相対している広い領域が一様に高い電界領域になっている。同一の印加電圧でも電極数が多くなるとドラム表面の電界の強さは大きくなる。

3.1 で明らかになったように帯電電極の数を増やすことにより溝 #5 の粉体回収率が低下する。図 6 の結果から回転ドラム上の粉体がより強い電界に、より長い時間曝されることによって、ドラムから飛び出していくためであることが類推できる。被選別粉体としてのフライアッシュが絶縁性粒子と導電性粒子に完全に分かれている

場合には、このような状況は起こりにくいが、両者の結合体である実際のフライアッシュでは複雑な性質を示すものと考えられる。

4.2 選別特性に及ぼす粒子径の影響

帯電電極を 4 本用いて多段選別を行ったときの、溝 #5 に回収された粉体についてそれぞれの粒度分布をアンドレアゼンピペット法¹³⁾により求めた。この方法は溶液中を沈降する速度がストokes 径で決まることに基づくもので、粒子密度が同一の場合に適用できる。フライアッシュは多成分からなる粉体であり、個々の粒子密度はそれぞれ異なると考えられるが、ここではフライアッシュの比重を仮に 2.0^{4,5,14)} の单一比重粒子と見なしして粒度分布を求めた。使用したピペットでは約 50 μm 以下の粒度分布を求めることができる。選別前のフライア

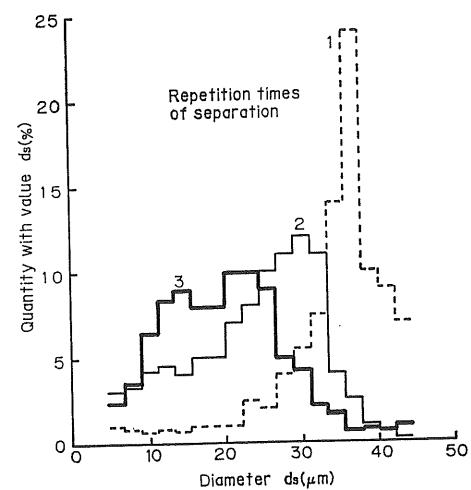


図 7 4 本の帯電電極を用いて選別を行ったフライアッシュの沈降法による粒度分布

Fig. 7 Particle size distribution of fly ash separated by the 4-electrode configuration evaluated with the sedimentation method.

ッシュの粒度分布を求めた結果、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以下の粒子が70%を占め、ふるい分けした場合の結果と一致した。

溝 #5に回収された粉体の粒度分布を図7に示す。選別回数が増えるにつれて粒径の大きいものが少なくななり、粉体の粒径が全体的に小さくなっている様子が見られる。1回目の選別で見られた粒度分布上の明確なピークが選別を重ねるたびに広くなる傾向を示し、3回目の選別の後にはもはやピークは見られず、 $10\sim25\text{ }\mu\text{m}$ の範囲の粒径で平たい分布を示している。

粉体の粒度分布は選別収率に大きな影響を及ぼすことが実験結果との比較から明らかである。選別が1, 2, および3回と進むにつれて、回転ドラムに付着する粉体が多くなり、溝 #5への回収量は10, 26, 40%と増加している。なお、1本の電極による5回目の選別では96%が回収された。これらの粒子径が小さくなり $30\text{ }\mu\text{m}$ 以下になると粉体はドラムに付着しやすく、選別されにくくなることがわかる。

図8に4B電極配置で選別されたフライアッシュの顕微鏡写真を示す。図(a)は1回目の選別における溝 #1の

粉体、図(b)は3回目の選別の#5の粉体である。図(a)では大きな粒子が存在する。各粒子について元素分析を行っていないが、黒く見える $100\text{ }\mu\text{m}$ 程度の大きな粒子は未燃カーボンそのものではなく、他の灰分と結合した粒子であると考えられる。このような大きな粒子は容易に取り除かれる。これに対して、図(b)ではほとんどが $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下の小さな粒子であり、数は少ないが黒く見える粒子も存在している。本研究で用いたように誘導帶電を利用する装置では $20\text{ }\mu\text{m}$ 程度の粒子を選別することは困難であり、他の方法¹⁵⁾を講ずる必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究ではフライアッシュの選別特性に影響を与える回転ドラム上の電界の強さに注目し、誘導帶電電極を複数設置することにより、その効果を実験的に確かめた。また、ドラム表面、高圧電極表面の電界の強さを計算により求め、粉体の挙動に及ぼす影響を考察した。本研究で得られた結果は次のとおりである。

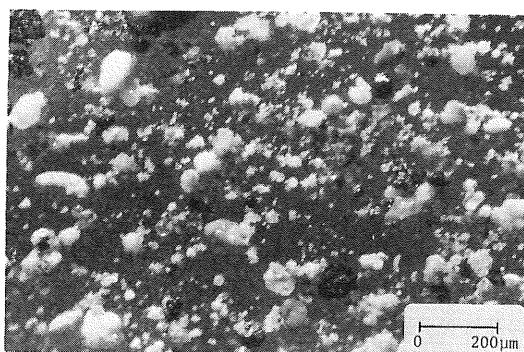
(1) 誘導帶電を利用する静電選別装置では高圧電極を複数設置することにより、1本の場合よりも優れた選別特性を示した。しかし電極数が多すぎる場合粉体の選別収率が減少するので最適の数が存在する。

(2) 4本の電極を用いた場合、粉体回収率、粉体中のカーボン含有率からみて多段選別を行う必要はない。

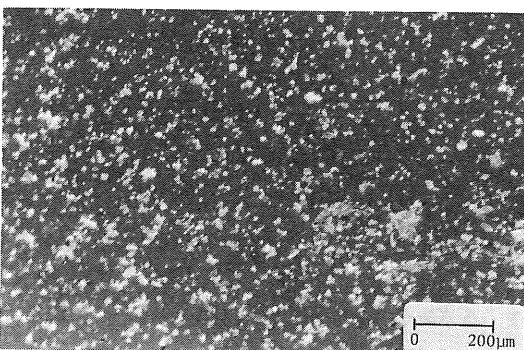
(3) フライアッシュの選別に対しては、粒度の効果が現れており、 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下の粒子に対して本手法では選別が困難である。

選別特性に対して選別空間の湿度が大きく影響しているようであり、粉体自体の含水量を含め、今後、水分の影響を検討する必要がある。また、静電選別の前提としてフライアッシュを導電性粒子のカーボンと、絶縁粒子の灰分という2種粒子の混合物とみなしたが、実際には、カーボンと灰分が結合した粒子が存在し、灰分は成分の異なる金属酸化物で構成されている。したがって、灰分の導電率を一義的に評価することは困難であり、これら灰分元素の影響など、きめ細かな検討が必要であると考える。

本研究で使用したフライアッシュは東北電力株式会社より提供を受けた。関係各位に謝意を表します。選別装置の製作に対して本学技官鈴木春男氏に、また実験補助に対して卒業研究生及川国弘氏（現在、（株）アドバンテスト）、高橋正樹氏（現在、山形大学大学院）に謝意を表します。



(a) Particles in the section #1 by the first-stage separation



(b) Particles in the section #5 by the third-stage separation

図8 選別されたフライアッシュの顕微鏡写真

Fig. 8 The microscopic photographs of fly ash separated in the section #1 and #5.

参考文献

- 1) 谷 重男：第11回石炭利用技術研究発表会, 22 (1989)
- 2) 松浦 敏：電気学会誌, 108 (1988) 488
- 3) 五十嵐和彦：電気評論, 68 (1983) 403
- 4) JIS A 6201, 日本規格協会 (1977)
- 5) JIS R 5213, 日本規格協会 (1979)
- 6) 静電気学会編：静電気ハンドブック, p.587, オーム社 (1981)
- 7) E.G. Kelly and D.J. Spottiswood : *Introduction to Mineral Processing*, p.291, John Wiley & Sons, New York (1982)
- 8) 飯田修一, 大野和郎, 神前 照, 熊谷寛夫, 沢田正三共編：新版物理定数表, p.56, 朝倉書店 (1978)
- 9) 浅野和俊, 庄田新一, 山本 忠：電気学会東北支部連合大会, IC-10 (1986)
- 10) 東山禎夫, 浅野和俊：電気学会全国大会, 1585 (1988)
- 11) 東山禎夫, 浅野和俊：電気学会東北支部連合大会, 1H4 (1988)
- 12) 梅津 勇, 浅野和俊：第13回静電気学会講演論文集, 7P C10 (1988)
- 13) 粉体工学研究会編：粒度測定技術, p.126, 日刊工業新聞社 (1975)
- 14) 粉体工学研究会, 日本粉体工業協会編：粉体物性図説, p.230, 産業技術センター (1975)
- 15) I.I. Inculent and M.A. Bergougnou : IEEE Trans. Ind. Appl., IA-13 (1977) 370