気流による炭じん飛散の防止に関する研究

竹内文章・狩野武*
山田聡**・福田栄則***
山中樹好***

静岡大学工学部 化学工学科†

本論文は数種類の粒度にふるい分けした石炭粒子を試料として風洞実験装置による飛散現象の解明および飛散防止技術について報告する。石炭は粒径 $180\ \mu\text{m}$ 程度の粒子が限界摩擦速度が最低になり、風速 $10\sim 15\ \text{m/s}$ の場合に飛散量が最大になる粒径は、 $200\sim 600\ \mu\text{m}$ の間に存在する。飛散しにくい微粒子は、飛散しやすい粒子との混合によって飛散量は増大する。また層表面上に粗粒子が存在することによって飛散量は増大し、それらを最大にする混合割合があることを示す。

水による飛散防止は、風速の程度および効果の持続時間に限界があるが、飛散防止用の薬剤を用いることによって飛散を完全に防止することが可能であり、その濃度、散布量を決める上の基礎資料および実際の現場で用いる上の知見を示す。

緒言

粉粉体の飛散現象は、環境公害、装置性能の低下、粉じん爆発などのトラブルを招く原因になる。

特に石炭は微粒子を含んだ粒状にして扱うことが多く、野外での山積みおよびそのハンドリングにおける飛散が大きな問題となっている。

著者ら²⁾は先に数種類の貯炭ヤードのモデルについて粒子の飛散現象を理論的、実験的に考察し、その防止技術について示した。

本研究では、炭じんの飛散を防止する上の基礎資料を得ることを目的とし、まず粒度がそろった数種類の石炭粒子を試料にした平面状および台形型のたい積層モデルと粒度が異なる試料を混合した平面状のたい積層からの飛散現象を調べた。さらに加湿、散水および飛散防止剤を散布することの効果などを検討した。これらの実験的研究によって二、三の知見を得たので報告する。

1. 実験装置および実験方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。テストダクトは、透明アクリル製で、長さは $3600\ \text{mm}$ 、横断面は高さ $150\ \text{mm}$ 、幅 $40\ \text{mm}$ の長方形である。テスト部入口には整流板を設け速度分布がほぼ均一になるように整流している。たい積層の容器は、取り替えはめ込むことができるようにしてあり、内のり寸法は次のとおりである。

(a) 平面たい積層型; 長さ $220\ \text{mm}$ 、幅 $30\ \text{mm}$ 、

深さ $5\sim 40\ \text{mm}$ 、以下図面では Plane と略す。

(b) 台形たい積層型; 上辺 $100\ \text{mm}$ 、底辺 $230\ \text{mm}$ 、高さ $50\ \text{mm}$ 、底角 37.6° ($0.656\ \text{rad}$)、幅 $30\ \text{mm}$ 、以下図面では Trapezoid と略す。

試料はオーストラリア産の Wollon Dilly 炭を粉砕し、3種類の粒度にふるい分けて用いた。その物性値を Table 1 に示す。

2. 実験結果および考察

2.1 単一粒子径の試料における飛散現象

上記3種類の試料とさらに平均粒子径 $48.3, 80.7, 115, 162, 229, 322, 458, 647, 1090, 1540\ \mu\text{m}$ の10種類にふるい分けた試料について、粒子の真密度 ρ_s と平均粒子径 d_s との積の平方根 $\sqrt{\rho_s \cdot d_s}$ と粒子が気流によって移動を始めるときの限界摩擦速度 u_{*c} との関係を図. 2 に示す。ここで u_{*c} は次のようにして求めた。粉体層表面上の速度分布は、層上面から鉛直距離 y_j の位置での速度 u_j 、摩擦速度 u_* とすると一般的に次式で表される²⁾。

$$\frac{u_j}{u_*} = 8.5 + 5.75 \log \left(\frac{y_j}{d_s} \right) \quad (1)$$

風速を徐々に増していったとき粒子が動き始めるときの $y_j = 75\ \text{mm}$ における u_j の平均値を求め、そのときの Eq. (1) による u_* を u_{*c} とした。図には Chepil¹⁾ が砂を用いて行った実験結果も示した。両者ともに u_{*c} は $\sqrt{\rho_s \cdot d_s}$ が約 $0.5\ \text{kg}^{1/2}/\text{m}$ の場合に最小値をとり、試料として用いた石炭では粒径 $180\ \mu\text{m}$ 程度の粒子が最も低い速度で飛散する。本実験範囲内においては、この値よりも大きい粒径では、 u_{*c} は $\sqrt{\rho_s \cdot d_s}$ にほぼ比例して

† 〒432 浜松市城北 3-5-1

* アマノ(株)

** 豊田合成(株)

*** 日本油脂(株)尼崎工場 油脂研究所

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Physical properties of coal samples

Sample number		1	2	3
Particle diameter	d_s [μm]	59.5	126	370
Angle of repose	ϕ_r [$^\circ$]	44.6	44.2	43.0
Angle of internal friction	ϕ_i [$^\circ$]	13.5	27.2	28.8
Angle of wall friction*	ϕ_w [$^\circ$]	23.8	21.9	19.5
Bulk density	ρ_b [kg/m^3]	552	677	701
		~ 823	~ 847	~ 797
True density	ρ_s [kg/m^3]		1360	

* Value of direct shear test on acrylic plate

増大する。またこの値よりも小さい粒径では、 u_{*c} は粒径が小さくなる程大きくなり、この要因は付着力による影響および粒子が層流底層の中に埋もれてしまうことによると考えられる。これらの傾向は篠原ら⁴⁾の報告とはほぼ同じである。

次に大きい風速 $u=10, 12, 15 \text{ m/s}$ の場合について d_s と飛散量 β [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] すなわち粒子をしきつめた面の単位面積から単位時間に飛散する粒子の質量との関係を Fig. 3 に示した。本研究では飛散量測定時間を送風開始後 20 s とした。この図に見るようにいずれの風速の場合についても β が最大になる粒子径の値が存在するが、その粒子径の値は先に示した u_{*c} が最小になるときの大きさは異なる。これは粒子径によって付着力が異なること、風速および粒子表面の粗度（粒子径）によって流体抵抗、粒子の摩擦力、境界層の厚みなどが異なることによると考えられる。

細かい粒子は飛散する量は少ないが、終末速度が小さいので一たん飛散すると落下しにくく遠方まで飛行する。岡部ら³⁾は飛散する炭じんのうち相対的に大きい粒子は重力によって近くに落下するため、貯炭施設で遠の飛散を考える場合は、粒子径約 200 μm 以下の粒子を対象とすればよいと報告している。しかし実際の貯炭山の石炭は粒度分布が広いので Fig. 3 で β が大きい値を示した d_s が 200~600 μm 程度の比較的大きい粒子がまぎれ移動して、それに付随している微粒子が飛散することを見逃してはいけない。

Fig. 2 Critical shear velocity of granule coal

Fig. 3 Relation between particle diameter and dispersing quantity

2・2 異種粒子径混合試料における飛散現象

左記の現象を確認するために、飛散量が少ない $d_s=59.5 \mu\text{m}$ の粒子と飛散量が多い $d_s=370 \mu\text{m}$ の粒子を混合した場合の飛散状態を調べた。その結果、混合試料では、その成分の大小粒子ともほぼ均一に飛散する様子が確認できた。Fig. 4 は混合試料全体の質量に対して $d_s=370 \mu\text{m}$ の粒子が占める割合 m と飛散量 β との関係を示し、斜線は飛散した二成分粒子の割合が飛散前のその割合と同じであると仮定した場合の $d_s=59.5 \mu\text{m}$ の粒子の飛散推定値である。この図から飛散しにくい微

Fig. 4 Dispersing quantity of mixing sample on two kind of fine powder

Fig. 5 Pile model of fine powder and coarse grain

Fig. 6 Dispersing quantity of mixing sample on fine powder and coarse grain

粒子は、飛散しやすい粒子と混合することによって飛散量が多くなり、飛散量を最大にする混合割合が存在することがわかる。このことは微粉体の流動化、閉そく防止などの技術に応用できると考えられる。

次に微粒子が飛散しない粗粒子と混合した場合に、どのような影響を受けるかを調べるために、Fig. 5 のようなたい積層モデルについて実験を行った。その結果の一例を Fig. 6 に示す。 $d_s = 59.5 \mu\text{m}$ の微粒子について、横軸の面積混合割合 $n(\pi/4)d_{sc}^2/A$ [-] は、粗粒子の

Fig. 7 Relation between dispersing quantity and moisture water content

Fig. 8 Relation between dispersing quantity and mass of sprayed pure water

断面積 $n(\pi/4)d_{sc}^2$ がたい積層全面積 A に占める割合を示す。ここで n は粗粒子の個数、 d_{sc} は粗粒子の平均粒子径で 13.3 mm である。縦軸は有効面積飛散量 β_e [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] で、細かい粒子が占める単位面積すなわち $A - n(\pi/4)d_{sc}^2$ から単位時間に細かい粒子が飛散する量である。この図は一例であるが、ある混合割合で β_e が最大になる。これは粗粒子の影響を受け表面近傍の気流が乱れることによって粗粒子のまわりの微粒子が乱流境界層に入り、気流からエネルギーを与えられ、飛散しやすくなるためだと考える。

2.3 水による飛散防止

炭じんに湿分を与えると粒子相互の付着力が高まり、それによって移動限界速度が大きくなって、飛散量を低減あるいは防止することができる。加湿湿気下で粉体を混合することによって湿分を与えた試料の湿分 w [%] (質量百分率) と β の関係を Fig. 7 に示す。水分を含ませると飛散防止に効果があることがわかる。この図は

$d_s = 126 \mu\text{m}$ の場合だけについて示したが、一般に實際上粒子の飛散を完全に抑制できる状態の限界水分 w_c は d_s が大きい程小さくなる傾向を示した。実際の貯炭山では、山全体に均一に湿分を与えることは不可能であり、表面から散水することが多い。そこで Fig. 8 は単位面積当たりの散水量 W [m^3/m^2] と β の関係について $d_s = 370 \mu\text{m}$ の粒子を用いて行った実験結果を示す。石炭の場合は均一に散水を行っても水はたい積層内部には浸透せず、水滴となつてたい積層表面にとどまった。そのため風速 10 m/s 程度の風の場合は、飛散防止することができたが、それ以上になると飛散防止することは不可能であった。さらに細かい粒子で実験を行ったところ、この限界速度はさらに低くなった。

2・4 薬品による飛散防止

粉体の飛散を防止する方法としては、粉体を限界水分 w_c 以上に保つことと、粉体層を何かで覆うことが考えられる。しかし前者は炭じん粒子の場合には、撥水性が大きいことと、石炭湿分は時間についてはほぼ指数関数的に減少すること、後者は設備費が高くなるという問題点がある。

そこで本研究では、上記の問題を解決する方法として次の2種類の飛散防止剤を用いて実験を行った。

(1) 湿潤型飛散防止剤 (KLN-10)*

界面活性剤と保水剤を有効成分とするため、散布水に少量添加すると炭じんはぬれやすくなり、その効果は長時間持続する。

(2) 固結型飛散防止剤 (KLN-20)**

高分子樹脂と界面活性剤を主成分とするため、水に希釈し貯炭山に散布すると石炭表面に強固な固結層を形成する。そのため固結層による空気遮断効果によって自然発火防止剤としての機能もある。

飛散防止剤に含まれている界面活性剤の作用による石炭微粒子への浸透力の程度を調べるために、微粉体沈降試験を行った。Fig. 9 は KLN-10 および KLN-20 の各種濃度 C_{10} , C_{20} [%] (容量百分率) の溶液表面に試料を 10 mg 落とし、粒子が溶液表面に浮かんた状態から拡がり液中に沈降を開始するまでの時間 t_s を測定したものである。このような微粒子は水では全く沈降しなかったが、ごく薄い濃度でも t_s は短くなった。KLN-10 の場合は濃度 0.05%, KLN-20 は 0.5% 程度まで t_s は急激に減少し、それ以上ではなだらかに減少する。これらの値はミセル限界濃度 ($c.m.c.$)*** にはほぼ相当して

Fig. 9 Sedimentation test of pulverized coal

Fig. 10 Relation between dispersing quantity and mass of sprayed solution of KLN-10 (effect of concentration)

いる。両者の値の相違は、原液の界面活性剤の濃度に相当している。粒子径による影響は、粒径が小さい程 t_s が長く、浸透しにくいことがわかる。

Fig. 10 は平面たい積層における KLN-10 の各種濃度溶液の単位面積当たりの散布量 W_{10} [m^3/m^2] と β の関係、Fig. 11 は台形型たい積層における KLN-20 の各種濃度溶液の単位面積当たりの散布量 W_{20} [m^3/m^2] と散布後 24 時間放置した後の飛散量 β の関係を示したものである。いずれも $u = 15 \text{ m/s}$ の場合であるが、水平たい積層で KLN-10 を使用した場合は、その $c.m.c.$ の 4~6 倍程度、台形型たい積層で KLN-20 を使用した場合は、その $c.m.c.$ の 6 倍程度の溶液を使用すると飛散を完全に防止することができる。また後者では散布量によって固結層の強度は比例的に増加することが観察された。

固結型飛散防止剤の場合は、固結前は界面活性剤の効果によって湿潤型飛散防止剤とほぼ同じ働きをするが、固結後に比べて飛散防止効果は少ない。そこで飛散を防

*** 日本油脂(株)製炭じん防止剤・自然発火防止剤(花王石鹼(株)、ライオン(株)、日本油脂(株)の共同研究によって開発した薬剤)を使用した。

*** ミセル限界濃度 (critical micelle concentration) とは、界面活性剤のミセルが形成される最低の濃度のことをいい、濃度と表面張力の関係から求まる。すなわち濃度の上昇に伴い表面張力は急激に減少するが、 $c.m.c.$ 以上では表面張力はほぼ一定となる。

Fig. 11 Relation between dispersing quantity and mass of sprayed solution of KLN-20 (effect of concentration)

Fig. 12 Relation between dispersing quantity and time lapse flow spraying of solution of KLN-20

Fig. 13 Relation between dispersing quantity and mass of sprayed solution of KLN-10 (comparison of single sample and mixing sample)

Fig. 14 Relation between dispersing quantity and mass of sprayed solution of KLN-20 (comparison of single sample and mixing sample)

ぐために十分な効果を持つまでに要する時間を知る必要がある。そこで Fig. 12 は KLN-20 を散布後、温度 298 K、相対湿度 80% の無風状態で放置時間 t_i を変化させて $u=15$ m/s の場合の β を調べたものである。100 min を過ぎるあたりから固結力が強くなり約 240 min 後には完全に飛散を防止することができる。本実験は屋内で行っているが、屋外では通風があるためさらに固結時間を短縮できると考える。

2・5 実際への応用

実際の貯炭山では粒度がそろっている積み山は少なく、広い粒度分布を持つ状態が多い。そこで $d_s=59.5$ μm と $d_s=370$ μm の粒子を混合した場合と $d_s=370$ μm の粒子だけの場合について飛散防止剤の効果を比較した。混合試料の場合は $d_s=59.5$ μm の粒子の飛散量が多くなる混合割合 $m=0.75$ (Fig. 4 参照) として実験を行った。Fig. 13 は平面たい積層における KLN-10 の散布効果、Fig. 14 は台形型たい積層における KLN-20 の散布効果を示したものである。 $d_s=370$ μm の粒子を基準にして考えると、両図から無散布および散布量が少ない場合は、微粒子を含むことによって粒子間の付着力が増加して飛散量を低減することができるが、飛散を完全に防止するためには単一粒子よりも微粒子を含んだ方が散布量は多く必要である。

また積み山の場合は、部分的に飛散しやすい場所と飛散しにくい場所が存在する。そこで積み山のまわりの気流の解析から積み山全体の初期飛散力の分布²⁾を数値計算によって求め、その値を考慮し散布濃度、散布量を調節すれば、経済的で効果的な散布が可能である。

結 言

気流による炭じん飛散の防止について実験的研究を行い、次のことがわかった。

(1) 石炭は粒径 $180\ \mu\text{m}$ 程度の粒子が最も低い速度で飛散する。また風速 $10\sim 15\ \text{m/s}$ の場合に、最も飛散量が多くなる粒径は、 $200\sim 600\ \mu\text{m}$ の間に存在する。

(2) 飛散しにくい微粒子は、飛散しやすい粒子と混合することによって飛散量が多くなる。また層表面に粗粒子が存在することによって飛散量が多くなる。これらには飛散量を最大にする混合割合が存在する。

(3) 水による飛散防止は、微粉体では水となじみにくいこと、時間的に水分が蒸発することなどによって、長時間および高い風速での効果は期待できない。

(4) 本文で示したような飛散防止剤を適量使用することによって炭じんの飛散を完全に防止することが可能である。

(5) 飛散量の多い粒子に微粒子が含まれると飛散量は低減するが、飛散を完全に防止するためには、単一粒子よりも微粒子を含んだ場合の方が、飛散防止剤を多く散布する必要がある。

Nomenclature

A	= space of deposit layer	$[\text{m}^2]$
C_{10}	= concentration of KLN-10	$[\text{vol } \%]$

C_{20}	= concentration of KLN-20	$[\text{vol } \%]$
d_s	= particle diameter	$[\mu\text{m}]$
d_{sc}	= particle diameter of coarse coal	$[\text{mm}]$
n	= number of coarse coal	$[-]$
t_i	= time lapse from spraying	$[\text{s}]$
t_s	= floating time of pulverized coal	$[\text{s}]$
u	= wind speed	$[\text{m/s}]$
u_{*c}	= critical friction velocity	$[\text{m/s}]$
W	= mass of sprayed pure water	$[\text{m}^3/\text{m}^2]$
W_{10}	= mass of sprayed solution of KLN-10	$[\text{m}^3/\text{m}^2]$
W_{20}	= mass of sprayed solution of KLN-20	$[\text{m}^3/\text{m}^2]$
w	= moisture water content	$[\text{wt } \%]$
w_c	= critical moisture water content	$[\text{wt } \%]$
β	= dispersing quantity	$[\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})]$
β_e	= dispersing quantity of effective area	$[\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})]$
ρ_s	= true density of particle	$[\text{kg}/\text{m}^3]$

Literature cited

- 1) Chepil, W.: *Soil Science*, **60**, 305 (1945)
- 2) Kano, T., F. Takeuchi, K. Jinno and A. Fujiwara: *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **21**, 18 (1984)
- 3) Okabe, Y. and Y. Ichikawa: *The Thermal and Nuclear Power*, **33**, 91 (1983)
- 4) Shinohara, T., H. Gō, Y. Nakamura and K. Horiuchi: Preprint of the 59th Meeting of J.S.M.E., No. 810-15, p. 319 (1981)

(1985年1月22日受理)

Study of Prevention of Dispersion of Coal Dust in the Wind

Fumiaki Takeuchi, Takeshi Kano,* Satoshi Yamada,**
Sigenori Fukuda*** and Kiyoshi Yamanaka***

Dept. of Chem. Eng., Shizuoka Univ., Hamamatsu 432

Key Words: Powder, Dispersion Prevention, Critical Friction Velocity, Dispersing Quantity, Moisture Content, Dust Control Agent

Dispersion phenomena of coal dust and methods to prevent dispersion were studied in a wind tunnel.

The critical friction velocity had its minimum value when the particle diameter of coal dust was around $180\ \mu\text{m}$. At wind speeds between 10 and $15\ \text{m/s}$, the dispersing quantity of coal dust had its maximum value when the particle diameter of coal dust was between 200 and $600\ \mu\text{m}$.

The dispersion quantity of less dispersable fine powder increased when it was mixed with more dispersable powder or when coarse grain was located on the surface of the powder bed, and the quantity had its maximum value at a certain ratio of the mixture.

The addition of water to coal dust was effective for preventing dispersion, especially at low wind speed and short elapsed time after its addition. Non-dispersion chemicals completely prevented dispersion. Fundamental data to determine the desirable amount and concentration of the chemicals for practical use were obtained.

* AMANO Co., Ltd.

** TOYODA GOSEI Co., Ltd.

*** Nippon Oil & Fats Co., Ltd., Amagasaki Factory, Oil & Fats Laboratory