研究報告

気流による粉粒体層からの飛散防止に関する研究*

Prevention of the Scattering of Stored Granular Materials in the Wind

狩野 武**
Takeshi KANO

竹内 文章**
Fumiaki TAKEUCHI

神野 勝司**
Katsushi JINNO

藤原 彰人**
Akihito FUJIWARA

1. 緒言

わが国では石炭、石灰石などの粉粒体状の物資を屋外に山積みして貯えることが多く、それらからの粉じんの飛散防止が要望されている。これについては、いくつかの研究結果^{1,2)}が発表されているが、現場に即したものが多く、いろいろな場合について、防止技術を理論と実際にわたって総合的に論じたものは少ない。

そこで本研究では、飛散を防止するうえの基礎資料を得ることを目的とし、まず粉粒体の飛散現象を理論的に考察し、つづいて貯炭ヤードの数種類のモデルについて、積み山まわりにおける気流の速度分布と粉じんの飛散状態を実測し、さらに散水および飛散防止剤散布の効果を調べた。その結果、粉粒体の飛散防止技術について二、三の知見を得た。

2. 実験装置および方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。テストダクトは、飛散状態の観察と解析をしやすいするために、断面は高さ 200 mm、幅 25 mm の長方形で長さ 3510 mm とし、透明アクリル板で製作した。テスト部入口における速度分布は分配板④を設けることによって調節した。

たい積物⑧の形状は、実際の貯炭山の約 1/200 相当とし、固定層モデルおよび粉体層モデルを用いて実験を行った。すなわち前者は、発泡スチロールで作り、積み山まわり 320 点の速度分布を熱線風速計⑩で測定し、その方向性はタフト法およびミスト検出器⑪で調べた。粉体層モデルとしては 3 種類のやしがら活性炭をいろいろ

Fig. 1 実験装置概要図

Table 1 実験条件および試料の物性

Upside length	l [mm]	0, 50, 100, 150, 200
Height	h [mm]	25, 50, 75
Base angle	θ [°]	12, 24, 36, (90)
Air velocity	u [m/s]	5, 6, 7, 10
Mass of sprayed liquid	(Water) W [l/m ²]	0, 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 1.7
	(KLN-20 3% Sol.) W_h [l/m ²]	0, 0.5, 0.75, 1.0

Sample number	1	2	3
Particle diameter d_s [μm]	168	385	775
Angle of repose ϕ_r [°]	36.0	42.2	40.7
Angle of internal friction ϕ_i [°]	27.5	30.5	30.8
True density ρ_s [kg/m ³]	1.9 ~ 2.2 × 10 ³		
Bulk density ρ_b [kg/m ³]	0.4 ~ 0.5 × 10 ³		

な形状に積み、飛散状態およびその時間的変化を観察し、また写真撮影⑫によって測定した。さらにあらかじめ検定しておいたスプレー式散水器で、粉粒体層表面に散水および飛散防止剤を散布した場合の飛散抑制効果を調べた。これらの実験条件および試料の物性を Table 1 に示す。

昭和58年5月17日受付

*粉体工学会昭和57年度第1回粉粒体輸送グループ会にて一部発表 (1982.11 浜松)

化学工学協会第48年会にて発表 (1983.4 京都)

**静岡大学工学部化学工学科 (〒432 浜松市城北3-5-1)

TEL 0534-71-1171

Fig. 2 有限要素法による速度ベクトルの解析

3. 解析および実験結果

3.1 粉粒体積み山層まわりの気流の解析

粉粒体積み山層からの粒子の飛散現象を解析するには、まず層のまわりの気流の速度分布を調べることが必要である。本研究では、積み山モデルまわりの気流の流れの状態を Navier-Stokes の方程式と連続の式を用いて表わし、それらを Galerkin 法で速度と圧力について定式化し、有限要素法によって速度分布を求めた。値を収束するために Newton 法に連続反復 (SOR) 法を組み込み逐次計算した。解析に用いたモデルの要素分割と数値計算の一例を Fig. 2 に示す。この図の x は積み山上流側先端からの水平方向の距離、 y は底面からの高さである。境界条件は次のようにおいた。

- 1) 積み山表面での速度は零である。
- 2) 入口部での鉛直方向の速度分布は、対数法則にしたがう。
- 3) 出口部の表面応力は無視する。

この解析では要素数は54個、格子点129個で、図中の矢印の向きと長さは、各点における風向きと大きさを示している。

Fig. 3 は積み山表面から高さ10 mm における風速 u_{10} の測定例を示したもので、負の値は逆流を表わす。積み山の高さ $h=50\text{mm}$ 、底辺長さ $L=240\text{mm}$ である。

Fig. 3 積み山近傍の速度分布

三角形積み、台形積み、よう壁を用いた積み方（以下よう壁積み）いずれの場合も積み山のの上流側先端部で一時減速し、頂点または風上エッジ部で最高になる。そして風下斜面の一部および積み山の後方に逆流域が生じる。これらの測定値は、数値計算の結果と同様な傾向を示した。これらの数値解析によって速度ベクトルを求めることによって粒子が飛散しやすい箇所を予測することができる。

3.2 積み山条件による飛散率の相違

積み山形状による飛散の程度の相違を調べるために、単位時間における飛散量を飛散前のたい積量で除したも

Fig. 4 風速と飛散率の関係

Fig. 5 積み山形状と飛散率の関係

のを飛散率 η_t [%/s]と定義し、諸条件との関係を考察する。測定時間はあらかじめ検定によって減量割合がほぼ定常な時間とし、送風開始後5～10秒とした。

Fig. 4は風速 u と η_t の関係を示したもので、いずれも $h=50$ mm, $L=240$ mmである。どの粒子径についても η_t は、風速が小さい場合は三角形積み比べ台形積みの方が大きい、風速が大きくなると逆転することがわかる。またよう壁積みの η_t は、台形積みの η_t に対して、 u が10 m/sの場合で20～50%程度であり、よう壁の高さに対して積み山の高さ h を低くすれば、さらに低減できる。

次によう壁を用いないで面積効率のよい積み山形状の台形積みについて考察する。Fig. 5は粒子径168 μ mの台形積みについて、上平面長さ l 、積み山高さ h 、底角 θ と η_t の関係を示したものである。 l についてみると、小さい風速では l が短い程、大きい風速では l が長い程 η_t は低くなる。 h についてみると、小さい風速では h が高い程、大きい風速では h が低い程 η_t は大きくなる。また θ についてみると、いずれの風速でも θ が小さい程 η_t は低い。これらの要因としては積み山の大きさ、速度分布、粉粒体の物性などが考えられ、積み山表面の個々の粒子について力学的に考察する必要がある。

3.3 飛散強度分布

粒子の飛散現象を調べるために、侵食流速論的な方法で簡単な解析を行なう。粒子の直径を d_s 、密度 ρ_s の球形と仮定し、空気密度を ρ_a 、粒子の近傍における速度を u_s とすると、積み山表面で1個の粒子が風から受ける流体推力 F_D は、次式で表わされる。

$$F_D = \frac{\pi}{8} \rho_a C_s d_s^2 u_s^2 \quad \dots\dots(1)$$

ここで C_s は粒子の抵抗係数で、粒子基準のレイノルズ数を $Re_s = \rho_a u_s d_s / \mu$ (μ は空気の粘性係数) とすると Lappel の式³⁾で与えられる。

$$\sqrt{C_s} = 0.63 + (4.8 / \sqrt{Re_s}) \quad \dots\dots(2)$$

また積み山表面での粒子1個の摩擦係数 F_R は、粒子の静止摩擦角を ϕ_i 、積み山表面の傾斜角を θ_x とすると次式で表わされる。

$$F_R = \frac{\pi}{6} d_s^3 (\rho_s - \rho_a) g (\tan \phi_i \cdot \cos \theta_x + \sin \theta_x) \quad \dots\dots(3)$$

1個の粒子が飛び出そうとする力は、 F_D と F_R の差で与えられ、これを初期飛散力 $B_0 [\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2]$ とする。 B_0 は Eqs. (1), (2) から次式で表わされる。

$$\begin{aligned} B_0 &= F_D - F_R \\ &= \frac{\pi}{8} \rho_a C_s d_s^2 u_s^2 - \frac{\pi}{6} d_s^3 (\rho_s - \rho_a) g \\ &\quad \times (\tan \phi_i \cdot \cos \theta_x + \sin \theta_x) \quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

ここで u_s は、前節3.1で述べた数値計算または実測値から次の2式で算出できる。すなわち粒子の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わされる。

$$\frac{u_j}{u_*} = 8.5 + 5.75 \log \left(\frac{y_j}{d_s} \right) \quad \dots\dots(5)$$

さらに u_s と u_* の関係は、石原⁴⁾ が近似的に表わした次式によって求まる。

$$u_s \approx 8.5 u_* \quad \dots\dots(6)$$

有限要素法によって数値計算した u_j の値を用いて Eqs. (5), (6), (4) によって求めた積み山表面上における B_0 の分布の一例を Fig. 6 に示す。この図は $d_s = 168 \mu\text{m}$ 、 $l = 100 \text{mm}$ 、 $h = 50 \text{mm}$ 、 $\theta = 36^\circ$ の積み山で $u = 7 \text{m/s}$ の場合である。 B_0 は風上斜面で急激に上昇し、風上エッジ部で最高になり、上平面で減少し、風下エッジ部以後は低い値になる。

次に B_0 を実際の現象と比較してみる。積み山の単位面積から単位時間に飛散した粒子量を飛散強度と定義し各経過時間毎に実測した飛散強度と時間の関係から時間0の場合に外挿した値を初期飛散強度 $\beta_0 [\text{kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})]$

Fig. 6 初期飛散力の分布
(点線は積み山形状を表わす)

Fig. 7 初期飛散強度の分布
(点線は積み山形状を表わす)

と定義する。Fig. 7 は Fig. 6 と同条件における β_0 の分布の一例を示したものである。積み山の大きさ、 u の速さ、 l の長さなどの相違によって、上平面後部において加速される場合があり、その部分の B_0 および β_0 がさらに大きくなることもある。 B_0 は力 $[\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2]$ を表わすのに対して β_0 は強度 $[\text{kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ を表わし単位は異なるが、両者は強い相関関係があることがわかった。し

Fig. 8 散水量と限界摩擦速度の関係

たがって積み山近傍の速度分布を解析し B_0 を計算すれば、粒子が飛散しやすい場所とその大きさを知ることができる。

3.4 飛散防止対策

粉粒体層からの粒子飛散防止の実用的な方法として散水が考えられる。その最適条件を検討するために、まず単位面積当たりの散水量 W [l/m²] と限界摩擦速度 u_{*c} の関係を調べ Fig. 8 を得た。ここで u_{*c} は Eq. (5) で求めた。すなわち風速を徐々に増していったときに粒子が動き始めるときの y_j および u_j を数点につき求め、そのときの u_* を u_{*c} とした。いずれの粒子径の場合も W の増加とともに u_{*c} も増加する。その傾向は W が 0.6

l/m² 程度から顕著になる。

次に各粒径の積み山モデルについての散水量 W と飛散率 η_t の関係を Fig. 9 に示す。約 0.6 l/m² の散水で η_t を半分以下に抑えることが可能である。風速 10 m/s の場では、粒子径 385 および 775 μm の粒子に対して約 1 l/m²、168 μm の粒子に対しては、約 2 l/m² でほとんどの飛散を抑えることが可能である。また前節で求めた B_0 の高い所に部分的に散水した場合の効果を粒子径 385 μm について示した。A—C は風上エッジ部付近（風上斜面の上部 1/2 と上平面の風上側 2/5）に散水した場合で、全体の散水に対して約 1/3 の散水量で η_t を半減させることができた。A—D は風上エッジ部付近と上平面（風上斜面の上部 1/2 と上平面全体）に散布した場合で約 1/2 の散水量で全体に散水した場合と同程度に飛散量を低減することが可能である。

しかし散水によって飛散を防止する場合は、粉粒体層表面の湿分が、時間についてほぼ指数関数的に減少していくために常に臨界湿度（小粒子が凝集して大きい粒子を形成する最小限必要な湿分）以上に保つように管理しなければならない。また強風の場合は凝集していた粒子が分散することもあり、完全に飛散を防ぐことが不可能な場合がある。Fig. 10 は飛散防止剤*の 3% 水溶液を散布して一昼夜静止した後に行なった飛散実験の測定結果でその単位面積当たりの散分量 W_k [l/m²] と飛散率 η_t の関係を示す。この図は粒子径 385 μm、 $u=7$ m/s の場

* 日本油脂㈱製 炭じん防止剤・自然発火防止剤、KLN-20（花王石鹼㈱、ライオン㈱、日本油脂㈱の共同研究によって開発した薬剤）を使用した。

Fig. 9 散水量と飛散率の関係

Fig. 10 飛散防止剤の散布量と飛散率の関係

合であるが、ある値以上の散布で η_i は 0 となり飛散が完全に防止されることがわかる。これは飛散防止剤を散布することによって粉粒体層表面の粒子が固結層を形成するためである。固結層の厚さおよび強度は散布量にほぼ比例するために、理論的に求められる B_0 の分布に応じて散布量を調節すれば経済的かつ効率のよい散布が可能である。

4. 結 言

気流による粉粒体たい積層からの粒子の飛散防止につ

いて実験および解析を行ない、次の事柄が明らかになった。

(1) 粉粒体層のまわりの流れ状態は、有限要素法による数値解析から予測でき、実際の流れと良好な一致を示す。その結果積み山表面近傍の風速分布は、風上エッジ部あるいは頂点で最高となり、積み山後方で逆流域が生じる。

(2) 三角山積みと台形積みと比べると、風速が小さい場合は前者、風速が大きい場合は後者の方が飛散率は小さい。またよう壁を設けることによって飛散をかなり抑えることができる。

(3) 数値計算によって求めた初期飛散力 B_0 は、実験から求めた初期飛散強度 β_0 と同様な傾向を示し、理論的に飛散しやすい箇所を予測できる。

(4) 散水あるいは飛散防止剤の散布によって粒子の飛散をほとんどあるいは完全に防止することが可能であり、数値計算によって求めた B_0 の値を考慮すれば、経済的で効率のよい散布が可能である。

本研究の結果は、実際の貯炭パイル表面などからの粒子飛散防止対策の基礎資料として応用できるが、飛散粒子の有害性、気象条件、設備費なども併せ考慮することが望ましい。

記 号		記 号	
B_0 : 初期飛散力	[kg·m/s ²]	u_{*c} : 限界摩擦速度	[m/s]
C_D : 抵抗係数	[—]	W : 散水量	[l/m ²]
d_s : 平均粒子径	[μm, m]	W_k : 薬品散布量	[l/m ²]
F_D : 流体推力	[N]	x : 積み山の先端からの距離	[mm]
F_R : 粒子摩擦力	[N]	y : 積み山の底面から鉛直方向の距離	[mm]
h : 積み山高さ	[mm]	β_0 : 初期飛散強度	[kg/(m ² ·s)]
l : 積み山の上平面長さ	[mm]	η_0 : 飛散率	[%/s]
L : 積み山の底平面長さ	[mm]	θ : 積み山の底角	[°]
Re_s : レイノルズ数	[—]	θ_x : 積み山表面各位置の傾斜角	[°]
u : 風速 (主流風速)	[m/s]	ρ_a : 空気密度	[kg/m ³]
u_{10} : 積み山から高さ 10 mm における速度	[m/s]	ρ_s : 粒子密度	[kg/m ³]
u_s : 粒子近傍の速度	[m/s]	ϕ_i : 粒子の静止摩擦角	[°]

参 考 文 献

- 岡部, 市川 : 火力原子力発電, 33, 1083(1982)
- 篠原, 郷, 中村, 堀内 : 日本機械学会講演論文集, No. 810—15, 319(1981)
- Lappel, C.E. and C.B. : *Shepherd Ind. Eng. Chem.*, 38, 605 (1940)
- Ishihara, T. and Y. Iwagaki : *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.*, 2, 1(1952)

Authors' Abstract

Prevention of the Scattering of Stored Granular Materials in the Wind

by

Takeshi KANO, Fumiaki TAKEUCHI, Katsushi JINNO, and Akihito FUJIWARA

(Dept. of Chem. Eng., Faculty of Eng., Shizuoka Univ.)

In recent years, a large quantity of granular materials such as coal is stored in the form of outdoor piling in Japan. Therefore, the development of a method to prevent or reduced their scattering due to wind is required.

In this study, the air velocity distributions around model heaps of several types and the amount of the scattered particles from various parts of the heap are investigated using granulated palmetto charcoal as the test material.

It is shown, both experimentally and theoretically, that the air velocity takes the maximum value at the edge of the upstream side, from where the air flow scatters the particles most intensively.

In conclusion, it is found that the pedestal form of the heap with the low height is the most favorable to minimize the scattering and that the spraying of pure water of a mass of 2 l/m^2 or 0.3% Coal dust control agent aqueous solution at a mass of 0.75 l/m^2 onto the edge of the heap is effective in preventing scattering.

List of Figures and Table

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2 Velocity vectors calculated by Finite Element Method

Fig. 3 Distribution of air velocity in the vicinity of pile surface

Fig. 4 Relationship between rate of scattering and air velocity

Fig. 5 Relationship between rate of scattering and pile shape

Fig. 6 Distribution of dispersing force at early stage

Fig. 7 Distribution of dispersing intensity at early stage

Fig. 8 Relationship between critical friction velocity and mass of sprayed pure water

Fig. 9 Relationship between rate of scattering and mass of sprayed pure water

Fig. 10 Relationship between rate of scattering and mass of sprayed dust control agent

Table 1 Experimental conditions and properties of granulated palmetto charcoal