水平風洞内凹部たい積層からの粒子飛散

— 邪魔板と非定常流れの影響 —

秋山鉄夫*, 宮本義之*
竹内文章**, 狩野武***

Bed load Transportation from a Trough in a Wind Tunnel — The Effect of Flow Disturbance due to an Obstacle and Periodic Change in the Flow Rate —

by

Tetsuo AKIYAMA†, Yoshiyuki MIYAMOTO†,
Fumiaki TAKEUCHI†† and Takeshi KANO†††

This paper is concerned with the bed-load transportation from a trough in a horizontal wind tunnel. The air velocity employed was between 8 and 15 m/s, and the bed-load consisted of glass beads. To study the effect of flow disturbance, a plate was installed at various angles and heights to the tunnel bottom upstream of the trough. In some experiments, the rate of air flow was altered periodically between two set values. The transient air flow influenced the bed-load transportation somewhat. The reverse flow caused by the plate has been found to have a significant effect on the bed-load transportation.

Key Words : Particle Movement, Flow Disturbance, Periodic Flow, Wind Tunnel

1. 緒言

大気中への粉粒体粒子の飛散現象は、砂丘における砂粒の飛散と移動、農耕地の風蝕、野積みされた粒子状原料あるいは製品の散逸などにみられ環境公害の原因の一つにもなっている。一方、粉粒体の空気輸送プロセスは気流による粒子の飛散あるいは流動現象を積極的に利用した方式である。気流による飛散、移動現象の防止あるいは利用についての的確な技術を得るには、まず気流による粉粒体層移動の機構を解明し、そ

の挙動を理解することが望まれる。

粒子の飛散については古くから多くの研究者によって実験と解析が進められてきた。まず気流による粒子の移動限界条件に関しては、Bagnold¹⁾、Chepil²⁾、千種ら³⁾が実験的に研究し、土屋ら⁴⁾は水流による流砂と気流による飛散の統一的な力学的解明を試みている。Einstein⁵⁾は水流による流砂量を確率論を用いて表わす式を導き、Kadib⁶⁾はその式を砂粒の飛散に応用して現象を説明している。狩野ら⁷⁾、竹内ら⁸⁾は飛散防止の観点から石炭粒子を用いて水、湿度による飛散防止効果を、郷ら⁹⁾は防風フェンスによる効果を研究した。本研究では、水平風洞実験装置によって、凹部たい積層からの粒子飛散現象を、特に流れに乱れがある場合について実験的に調べた。実験では、流れの規則的な乱れを得るため次の二つの方法を用いた。

(1) 邪魔板を凹部粉粒体たい積層の上流側に設置する。

(2) 周期的に流速を変化させる。

(1)は邪魔板による飛散防止効果、(2)は流速が断続的に変化する自然風による粒子の飛散に関する基礎デ

昭和61年8月4日受付

* 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 内線 403

** 岡山大学環境管理センター (〒700 岡山市津島中3-1-)
TEL 0862-52-1111

*** アマノ(株) (〒222 横浜市港北区大豆戸町 275)
TEL 045-401-1441

† Dept. of Chem. Eng., Shizuoka University,
Hamamatsu 432

†† Okayama Univ. Administration Center for Environmental Science and Technology, Okayama 700

††† Amano Co., Ltd, Yokohama 222

ータを得ることを目的としたものであり、それについて二、三の知見を得たので報告する。

2. 実験装置

実験装置の概要をFig. 1に示す。テストダクトは長さ3.6 m、高さ150 mm、幅40 mm、厚さ5 mmの亚克力板製である。気流はブロー④で風洞⑥内に送入され、凹部たい積層⑦(たい積層長さ $l = 0.22$ m)内の粉粒体を飛散させ、バグフィルター⑩を通り排出される。流速はピトー管および熱線風速計⑬を用いて測定した。

本実験装置は竹内ら⁸⁾が用いた実験装置と同一であるが二つの変更を加えた。第一の変更は、Fig. 2に使用記号を示すように、凹部たい積層の上流側の距離 D の所に高さ L 、傾斜角度 θ の邪魔板を設置したことである。Fig. 2において x は邪魔板後端(図中A)を原点とした水平方向位置、 y は風洞底面からの鉛直方向位置、また h は風洞底面から粉粒体層までの平均深さを表わし、初期値は $h = 0$ である。

第二の変更は風洞内に流入する気流の速度が時間的に変化する場合の飛散量の変化を調べるため、Fig. 1に示す電磁弁②を設け、その開閉は周期発生装置①によって設定できるようにした(以下「非定常流れ」と記す)。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2 Details of trough and obstacle

Fig. 3 Periodic air velocity

非定常流れの場合はFig. 3のように、上限流速 u_1 と下限流速 u_2 を周期 T [s]で繰り返すように設定した。平均流速 $\bar{u}$ は理想的な波形を考えて次式による値で表わす。

$$\bar{u} = \frac{u_1 T_1 + u_2 T_2}{T_1 + T_2} \quad (1)$$

ここで、 T_1 は u_1 の、 T_2 は u_2 の継続時間を表わし、 $T = T_1 + T_2$ を一周期とした。

3. 実験方法

3.1 一様流れについて

本研究の目的は、邪魔板が粒子の飛散現象におよぼす効果、および非定常流れの影響を調べることにあるので、邪魔板無し、流速一定の実験条件(以下「一様流れ」と記す)で粒子飛散量の経時変化を測定した。試料は粒径が $20\mu\text{m}$ から $1000\mu\text{m}$ まで7種類のガラスビーズを用い、平均流速 $\bar{u}$ は 8 m/s から 15 m/s までの範囲で測定した。その結果をFig. 4に示す。粒径 $100\mu\text{m}$ から $230\mu\text{m}$ までの粒子が最も飛散量が多い。また、飛散初期においては粒径 $230\mu\text{m}$ の粒子が飛散しやすい。そのため以下に述べる実験はおもに粒径 $230\mu\text{m}$ の粒子を用いて行なうことにした。

Fig. 4 Cumulative bedload transportation without obstacle

Table 1 Experimental conditions

Average velocity	$\bar{u}$ [m/s]	8 ~ 15
Particle diameter	d_s [μm]	20 ~ 1000
Plate height	L [m]	0.01, 0.02, 0.03
Angle of plate to the tunnel bed	θ [rad]	$\pi/2$, $\pi/3$, $\pi/6$
Periodic time	T [s]	0.5, 1.0, 2.0
High velocity	u_1 [m/s]	13 ~ 15
Low velocity	u_2 [m/s]	9 ~ 12

3.2 邪魔板を設置した場合の飛散実験

風洞底面の凹部たい積層から上流側の距離 D の所に邪魔板を設置し、一樣流れの場合と同様にたい積飛散量の経時変化を測定した。

3.3 非定常流れの飛散実験

平均流速 $\bar{u}$ ，上限流速 u_1 ，下限流速 u_2 ，周期 T を設定した後、一樣流れの場合と同様にたい積飛散量の経時変化を測定した。なお、各実験の操作条件は **Table 1** のとおりである。

4. 実験結果および考察

4.1 邪魔板の影響

4.1.1 風洞内の速度分布

まず、風洞内の気流の速度分布を熱線風速計を用いて測定した。なお、逆流領域の検出はタフト法を用いた。その結果を **Fig. 5** に示す。邪魔板を設置することによってその後方に逆流が生じる。この逆流は、邪魔板高さ L の約 5 倍 ($x/L \approx 5$) の所で最大速度になり、 $x/L \geq 10$ で消滅している。乱流において障害物下流の流れの分離が、 $x/L = 7 \sim 16$ の所で起こる報告がある^{10, 11)}。逆流の鉛直方向を考えると、図中の線 a, b がそれぞ

Fig. 6 Velocity profiles near the tunnel base in the downstream of a plate

れ邪魔板傾斜角度 $\theta = \pi/2$ rad, $\theta = \pi/6$ rad の場合の渦の中心を示しており、これらの線より下は逆流領域である。邪魔板傾斜角度が小さくなると渦は小さくなり、逆流領域も小さくなっている。

凹部たい積層からの粒子飛散は、風洞内底面付近の流れに支配されるため、邪魔板を設置した場合の底面付近 ($y = 0.002\text{m}$) での流速分布を測定した。その結果を **Fig. 6** に示した。この測定によって底面における逆流は $x/L \approx 5$ の所で最大でその速度は平均流速の約 40 ~ 50% であることがわかった。また邪魔板傾斜角度が逆流領域に与える影響としては、 $\theta = \pi/6$ rad の場合は $\theta = \pi/2$ rad に比べ逆流領域は約 25%，逆流最大流速は 10% 減少する。なお **Fig. 5** および **Fig. 6** に示した流速分布は本実験の範囲では平均流速 $\bar{u}$ ，邪魔板高さ L によらず同様の分布をとる。

4.1.2 邪魔板が飛散量におよぼす影響

まず、邪魔板を凹部たい積層の直前 ($D = 0\text{m}$) に設置して飛散量の経時変化を測定した。その結果を **Fig. 7** に示す。飛散量は飛散の初期においては一樣流れの

Fig. 5 Velocity profiles in the downstream of a plate

Fig. 7 Cumulative bed-load transportation with obstacle

場合のほうが邪魔板を設置した場合よりも多いが、ある時間を経過すると邪魔板を設置した場合のほうが多くなる。邪魔板を設置すると逆流によって、粒子は巻き上げられ飛散する。この逆流中の最大速度は一樣流の場合の約40～50%である。したがって邪魔板を設置した場合は飛散初期においては一樣流の場合に比較して飛散量は少ない。しかし逆流は凹部たい積層深く流入することができるため最終的な飛散量 (Fig. 7) は、 $l/L = 22.0$ で約50%, $l/L = 11.0$ で約30%多くなる。また邪魔板が高い程飛散量は少なく、同じ高さでは邪魔板傾斜角度が小さい程、飛散量は少ない。

邪魔板高さが飛散へおよぼす影響は、邪魔板による流速分布の変化、特に逆流の発生に関係している。邪魔板高さ L が 0.01 m および 0.02 m の場合は逆流領域がそれぞれ 0.1 m および 0.2 m であることから、たい積層上に逆流の消失地点が生じる。(ただし、 $l = 0.22$ m であることによる) しかし、 $L = 0.03$ m の場合はたい積層すべてが逆流領域に含まれる。このことから、た

Fig. 8 Effect of obstacle position on the rate of bed-load transportation

い積層上に逆流と逆流消失以降の流れを伴うと飛散量は多くなると考えられる。

次に凹部たい積層から邪魔板までの距離 D を変えて飛散量の経時変化を測定した。その結果を Fig. 8 に示す。たて軸は飛散速度を、横軸は邪魔板距離 D を示し、粉体層深さ h をパラメーターとして扱っている。 $D/L = 0$ から $D/L = 8$ までは飛散速度がほぼ一定で飛散量は多く、 $D/L = 10$ では h が深くなるにつれて飛散量は著しく少なくなる。これは逆流がたい積層直前で消失しているためである。

逆に $D/L = 5$ では逆流の消失点は、粉体層中にあり、この場合は前述の $D = 0$ m の場合と同じく飛散量は多くなる。

4.2 非定常流れが飛散におよぼす影響

流量を周期的に変化させた場合の飛散について考える。Fig. 9 は、周期 T を 0.5, 1, 2 s の 3 種類、平均流速 $\bar{u}$ は一定 ($\bar{u} = 12.3$ m/s) とした時の飛散量の経時変化を示す。その他の u_1 , u_2 , T の場合も含めて一般的に平均流速で比較すると、非定常流れの場合は一樣流に比べて飛散量は多くなる。また、 u_1 と u_2 の差が大きいほど飛散量は多くなる (最大 10%)。周期 T については周期が短いほうが飛散量は増加した。ここで流体のもつエネルギーが飛散におよぼす影響をみるため、る積エネルギーに対する飛散量を Fig. 10 に示す。流体のもつエネルギーは、

$$E = \int_0^t \left(\frac{1}{2} \rho A u^3 \right) dt \quad (2)$$

から算出した。 ρ は流体密度、 A は風洞断面積、 u は空気流速である。Fig. 10 は初期において飛散量は $\bar{u}$, u_1 , u_2 の値にかかわらず一定であることを示している。すなわち飛散量は流体のもつエネルギーに支配されていると考えられる。しかし、凹部の粉体深さ h が深くなると ($E \geq 1200$ J), 上限流速 u_1 の影響が大きくなり

Fig. 9 Dependence of cumulative bed-load transportation on the frequency of periodic changes in air velocity

Fig. 10 Cumulative bed-load transportation versus cumulative energy of the periodic air flow

Fig. 11 Effect of obstacle on cumulative bed-load transportation in the case of periodic air flow

飛散量の変化が現れる。

4.3 非定常流れにおける邪魔板の影響

邪魔板はたい積層に逆流消失点がある場合は飛散を増加させ、また非定常流れは一樣流れに比べ、飛散量を増加させることがわかった。そこで非定常流れにおける邪魔板の影響について調べた。その結果をFig. 11に示した。

邪魔板有りの非定常流れは、邪魔板有りの定常流れとほぼ同様の飛散量を示すがわずかに少なくなる。邪魔板を設置した場合は気流が凹部粉体たい積層深くまで流入して粒子を飛散させるため、強い流れの持続が

必要である。非定常流れの場合は、動きを開始した粒子群の一部が、流速が小さくなった時に再び凹部に逆戻りするため、飛散量は、少なくなると考えられる。

5. 結 論

水平風洞内の凹部(長さ0.22 m)にたい積した粉粒体層の飛散に関する研究を行なった。特に横断面の高さ150 mm, 幅40 mm, 長さ3.6 mの風洞内に邪魔板を設置した場合と、非定常流れについて平均流速8～15 m/sの範囲で粒径が20～1000 μmの7種類のガラスビーズを用いて実験を行ない、以下の結論を得た。

(1) 風洞内流れにおいて邪魔板傾斜角度 $\theta = \pi/2$ radのとき邪魔板からの距離 x と邪魔板高さ L との比が10($x/L = 10$)の範囲が逆流領域になり、 $x/L = 5$ のとき逆流速度は最大となり風洞内平均流速の約40～50%であった。

(2) 一樣流れの飛散は邪魔板を設置した場合と比較して初期では単位時間当りの飛散量は大きい、時間の経過とともに急激に減少し、180 s以後($h > 0.02$ m)ではほぼ零となる。これに対し邪魔板を設置した場合は一定の飛散割合を保ち、最終的には、一樣流れの場合に対し $l/L = 22.0$ で約50%, $l/L = 11.0$ で約30%多くなる。

(3) 非定常流れの場合は定常流れの場合と比較して同じ平均流速では、るい積飛散量は多くなる。しかし飛散初期においては、周期や瞬間流速に関係なく、飛散量は気流のるい積エネルギーによって決定される。

(4) 非定常流れにおける邪魔板の効果は、定常流れに邪魔板を設置した場合と同様の傾向になるが飛散量は、わずかに少なくなる。

以上のような結論を得たが風洞内たい積層からの粉体飛散はたい積層の形状(特に深さ方向)が時間とともに変化する非定常な系であり、邪魔板の影響をも関連させて飛散量を理論的に推算することはきわめて困難である。今後はたい積層の形状、粉体物性、および逆流領域の流動状態などについてさらに詳細な研究を続ける必要がある。

Nomenclature

A	: cross sectional area of the wind tunnel	[m ²]	L	: plate height	[m]
D	: distance as shown in Figure 2	[m]	l	: trough length	[m]
d_s	: particle diameter	[μm]	T	: periodic time	[s]
E	: cumulative energy of the air flow	[J]	T_1, T_2	: periodic time for high velocity and low velocity, respectively	[s]
h	: average depth of the particle bed	[m]			

$\bar{u}$	: average velocity in the wind tunnel	[m/s]	x	: distance from the plate (Figure 2)	[m]
u_1, u_2	: high velocity and low velocity, respectively, in one cycle	[m/s]	y	: distance from the tunnel bed (Figure 2)	[m]
w	: cumulative bed-load transportation per unit area	[kg/m ²]	θ	: angle of the plate to the tunnel bed	[rad]
			ρ	: air density	[kg/m ³]

References

- 1) Bagnold, R. A. : "The Physics of Blown Sand and Desert Dunes", Mathuen & Co. Ltd. (1954)
- 2) Chepil, W. S. : *Soil Science*, **60**, 397 (1945)
- 3) Chigusa, T. and M. Akiba : *Nogyo Doboku Kenkyu*, **1**, 31 (1929)
- 4) Tsuchiya, M. and Y. Kawada : *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.*, **13B**, 217 (1970)
- 5) Einstein, H. A. : U. S. Dept. Agr., Soil Conservation Service, Technical Bulletin, 1026, 1 (1950)
- 6) Kadib, A. L. A. : *Proc. A. S. C. E.*, **92**, No. WW 2 (1966)
- 7) Kano, T., F. Takeuchi, K. Jinno, and A. Fujiwara : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **21**, 18 (1984)
- 8) Takeuchi, F., T. Kano, S. Yamada, S. Fukuda, and K. Yamanaka : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **11**, 674 (1985)
- 9) Go, H., T. Shinohara, Y. Nakamura and K. Horiuchi : Preprint of the 914th Meeting of J. S. M. E., No. 810-18, 55 (1981)
- 10) Bradshaw, P. and F. Y. F. WONG : *J. Fluid Mech.*, **52**, 113 (1972)
- 11) Celenligil, M. C., and G. L. Mellor : *J. Fluids Eng.*, **107**, 467 (1985)