移動層粒子充填層における粉じん堆積特性

嵐 紀 夫*, 檜 戸 清*, 黒 田 博**

Deposition Characteristics of Fly-ash Dust on a Moving Bed of Granular Materials

by

Norio ARASHI[†], Kiyoshi NARATO[†] and Hiroshi KURODA^{††}

Penetration characteristics of fly ash suspended in gas flowing through a fixed packed bed of granular materials were determined experimentally. Gas velocities through the 0.4m thick bed of 5–16mm diameter particles ranged from 0.5–2.0 m/s. Experiments were also performed in a moving packed bed in which the accumulation of fly ash was measured. These experimental results were compared with that of prediction by employing data from the fixed packed bed tests. It was observed that calculated values of both the amount of dust accumulated and penetration in the moving bed agreed well with measured values when an appropriate correction factor was introduced.

Key Words : Moving Bed, Dust, Deposition, Penetration, Granular Bed

1. 緒 言

移動層型反応装置は多方面の応用範囲があり、特に、粉じんを含むガスと粒状物質の反応に有効である。その際、充填層内の粉じん堆積量分布を明らかにし、最適な粒子移動速度を選定する必要がある。移動層における粒子の抜き出し速度を決めるには、まず充填層における粉じん堆積特性を明らかにしなければならない。充填層への堆積に関する研究としては、Schmidtら¹⁾がGebhartら²⁾、Jacksonら³⁾の研究結果をもとに粉じんの堆積率を表す半理論式を求め、実験式と良く一致することを報告している。また森ら⁴⁾はいったん捕集された粉じんが再飛散を伴いながら起きる堆積に

ついて報告している。しかしこれらの研究は充填層による集じんを対象としており、したがって、ガスと触媒粒子などの反応を目的にする粒子充填層のように、比較的大粒径の粒子を用いて粉じんの堆積が起こらないようにする場合とはかなり様子が異なっている。

また、移動層での粉じん堆積に関する研究として、児玉ら⁵⁾が移動層のグラニューラフィルタを用いた集じん実験の結果を報告しているが、充填層の厚さ、粒子の移動速度などの影響が明確でない。

本研究では、まず粒径5～16mmの充填層を用いて粉じん堆積特性を明らかにし、これをもとにして移動層における粉じんの堆積特性を明らかにすることを目的とした。

2. 実験装置および実験方法

2.1 固定層における粉じん堆積実験

固定層粒子充填層への粉じん堆積特性の実験に用いた装置のフローシートをFig.1に示す。ガスは蒸発量1.5 t/hの重油焚きボイラから発生する燃焼排ガスをを用いた。このガスの中には粉じん量がおよそ10 mg/Nm³程度と少ないので、フィーダよりフライアッシュ

昭和63年1月18日受付

* (株)日立製作所日立研究所(〒319-12 日立市久慈町4026)

TEL 0294-52-5111

** バブコック日立(株)呉工場(〒737 呉市宝町6-9)

TEL 0823-21-1161

† Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., 4026

Kuji-cho, Hitachi 319-12

†† Kure Works, Babcock-Hitachi KK., 6-9

Takara-cho, Kure 737

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus for fly ash accumulation in fixed granular bed

をガスに供給して、ガス中の粉じん濃度を高めた。ボイラの出口には高温電気集じん機(EP)を設置することにより、ここでおよそ99%粉じんを捕集し、捕集した粉じんはスクリーコンベアによって再びフィーダへ戻すようにした。高温EPの後流には直径0.15m、層高0.4mの固定層粒子充填層を設置した。高温EPを設置した目的は、フィーダから供給するフライアッシュのうち、粒径の細かい粒子のみを含んだガスを後流の粒子充填層に流すことができるようにするためである。

実験に使用したフライアッシュの粒径分布を**Fig.2**に示す。粒径分布はダストモニタ(日立製AN-100型)を用いて測定した。高温EPの入口では50%平均径が $D_d=30\mu\text{m}$ であるのに対し、充填層の入口ではおよそ $D_d=6\mu\text{m}$ であった。また、粉じん濃度はJIS円筒ろ紙法および上記のダストモニタにより測定した。そのとき充填層入口粉じん濃度がおよそ $0.1\sim 0.15\text{g}/\text{Nm}^3$ になるようにEPの荷電量を調整した。

粒子充填層の下部よりフライアッシュ含有燃焼排ガスを通気し、充填層入口、出口の粉じん濃度差を測定し、これより捕集率を求めた。捕集率は充填層内の粉

Fig.2 Particle size distribution of fly ash utilized for experiments

じん堆積量によって変化するが、堆積量が $5\text{kg}/\text{m}^3$ を越えるとはほぼ一定値になったので、捕集率の測定は、粉じん堆積量が $5\sim 8\text{kg}/\text{m}^3$ になったところで行った。実験条件は、ガス流速を $0.5\sim 2.0\text{m}/\text{s}$ の範囲、充填粒子の粒径を $5\sim 16\text{mm}$ の範囲に変化させた。また、このときの充填空隙率は $\epsilon=0.38$ 程度であった。

2.2 移動層における粉じん堆積実験

移動層での粉じん堆積は、層高15m、層厚2m、層幅0.8mの直交流型移動層を用いて実験を行った。

実験条件は、充填粒子に粒径 $10\text{mm}\phi$ のものを用いた。ガス通気条件は、粉じん濃度 $c_0=300\text{mg}/\text{Nm}^3$ 、ガス流速 $u=0.35\text{m}/\text{s}$ で水平方向に通気し、充填層粒子移動条件は平均降下速度 $v=0.6\text{m}/\text{h}$ とした。ここで、移動の際に充填空隙率が $\epsilon=0.42$ 程度に大きくなるが、粉じんの堆積特性は固定層と差はないものと考えた。

移動層入口、出口間の集じん率測定は前述のJIS法により、入口、出口の粉じん濃度より求めた。また、移動層内の粉じんの堆積量を、充填層内より充填粒子を堆積粉じんとともに真空掃除機によってサンプルし、その粉じん量を秤量することにより求めた。ここで、粉じん堆積量は、単位充填層容積あたりに保持されている粉じん量で定義する。この値が大きいほど、充填層の空隙がフライアッシュで埋められていることを示す。

3. 実験結果および考察

3.1 固定層における粉じん堆積特性

(1) 通気ガス流速および充填粒子径の影響

層高0.4m、粉じん濃度 $0.1\sim 0.15\text{g}/\text{Nm}^3$ 、粉じん平均粒径 $5\sim 10\mu\text{m}$ の条件のもとで、通気ガス流速および充填粒子径を変化させたときのダスト透過率 c/c_0 の測定値を**Fig.3**に示す。その結果、粉じん透過率 c/c_0

Fig.3 Influence of particle diameter of packed material and gas velocities on the penetration of dust through a packed bed

はガス流速 1m/s 以上では充填物粒径が大であるほど、また、流速が高いほど大きくなることが明らかになった。粒子層による粉じんの捕集には粉じんがガス中を拡散して充填物に捕集される拡散捕集および粉じん粒子が気流とともに運動する際、その慣性のためにガス流よりそれて充填物に捕集される慣性衝突捕集があり、その捕集効率は慣性パラメータ ψ の値によって支配される。粒子充填層における慣性パラメータについては、和田ら⁶⁾は Fig.4 に示すように粒子と粒子の間隙を通ったガスがその先にある充填粒子に衝突するという一種のカスケードインパクトの作用によって粉じんが捕集されると考え、次式で表わす慣性パラメータで評価している。

$$\psi = \frac{u \rho_d D_d^2}{18 \epsilon \mu D_s} \quad (1)$$

ここで、 ϵ は充填層空隙率、 D_s は Fig.4 の上に示すように、充填層空隙の流路の相当径 D_s とし、直径 D_p の粒子が充填されているときの最密充填と最粗充填の中間の値をとり、

$$D_s = 0.19 D_p \quad (2)$$

とした。

次に、この慣性パラメータにより、Fig.3 に示した粉じんの透過率 c/c_0 を評価する。Fig.3 において、充填層粒子に関する代表寸法である粒径 D_p が大きいほど、すなわち、慣性パラメータが小さいほど透過率 c/c_0 が高くなっており、慣性衝突の性質をよく表わしていると考えられる。しかし、ガス流速が大、すなわ

Fig.4 Concept of dust impact on particles of packed bed

Fig.5 Relationship between penetration and inertia parameter

Gas velocity (m/s)	Particle size			
	7.6 mm	9.3 mm	12.7 mm	16 mm
2.0	●	⊙	⊗	
1.7		▼	▽	▽
1.0	▲	△	△	
0.5	■	□	⊠	

ち、慣性パラメータが大きいほど透過率 c/c_0 高くなる現象が見られる。このことは、ここに示した実験での粉じん捕集は慣性衝突支配であるが、粉じんの再飛散を伴いながら粉じんが捕集されているものと考えられる。そこで、Fig.3 の結果を慣性パラメータで整理し、透過率との関係を見た。Fig.5 にその結果を示す。ガス流速一定の条件では慣性パラメータ ψ が大きいほど透過率 c/c_0 が低くなっており、慣性衝突によって粉じんが捕集されていることを示唆している。一方、充填物粒子径が一定の条件でガス流速が変化する場合、慣性パラメータ ψ が 0.2 以下では ψ がおおきくなるにつれて透過率 c/c_0 が高くなる。これは、ガス流速の高い条件では前述のように、いったん堆積した粉じんの再飛散を伴いながら粉じんが堆積するためと考えられる。

(2) ガス中粉じん濃度の影響

次に、充填層に通気するガス中の粉じん濃度 c_0 と粉じん透過率の関係を測定した。Fig.6 に測定結果を示す。この場合も粉じんの再飛散を伴いながら堆積が起こる条件であるが、充填層の層厚 L が 0.4 m の場合充填層入口粉じん濃度 $c_0 = 30 \sim 160 \text{ mg/Nm}^3$ の範囲では、粉じん透過率 c/c_0 は入口粉じん濃度にほとんど依存しないとしてよいことがわかる。ここで、粉じんの粒径分布あるいは充填層内の粉じん堆積量が同一であれば、充填層厚 L が 0.4 m よりも大きくなった場合には、対数透過式によって粉じん透過率を表わすことができる。実際には、充填層の出口側に近い部分は入口側に比べて粉じんの粒径は細かく、また、堆積量も多いため、

Fig. 6 Relationship between penetration and dust concentration

無条件で対数透過式が成り立つとはいえないが、Fig. 6の粉じん濃度変化のなかにはすでに粉じん粒径変化の効果も含まれていること、また、前述のように粉じん堆積量が $5\sim 8\text{ kg/m}^3$ の範囲では透過率は一定であることを考慮すると、この範囲を大きく逸脱しない条件であれば、擬似的に対数透過式が成り立つと考えてよいものとする。

以上の考察により、粒子径、ガス流速、粉じん濃度および充填層高の異なる粒子充填層における粉じん透過率を予測することができるようになった。

3.2 移動層における粉じん堆積特性

(1) 粉じん堆積状態の測定結果

前述の層高15m、層厚2m、層幅0.8mの移動層に粒径 $10\text{ mm}\phi$ の粒子を充填し、粉じん含有ガスを流速 $u=0.35\text{ m/s}$ で通気し粒子平均移動速度 $v=0.6\text{ m/h}$ で移動したときの充填層への粉じんの堆積量分布を測定した。このとき、充填層の最上部より供給された粒子が、下部より排出されるまでの時間は25時間であるので、これ以上の十分定常に達した時間で測定を行った。Fig. 7に測定結果の一例を示す。

その結果、大部分の粉じんは、全層厚2.0mのうちのガス入口側の層厚0~0.4mの範囲に堆積することがわかる。また、充填層の上下方向の分布は直線的な分布ではなく、充填層の下部ほど粉じんの堆積量が急増するのが認められた。

そこで、次に移動層における粉じん堆積量を計算によって予測する。

(2) 粉じん堆積状態の予測

移動層での粉じん堆積を、上で述べた固定層での粉じん堆積特性をもとに予測する。直交流型の移動層内の粉じんの収支は次式によって表わすことができる。

$$u \frac{dc}{dx} + v \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Fig. 7 Measured dust accumulation on the particles of moving bed

ところで、Fig. 3に示した実測値はガス流速が最低 0.5 m/s の範囲までしかなく移動層での実験条件である $u=0.35\text{ m/s}$ は外挿により予測しなければならない。そのため、Fig. 3の結果より充填粒子径 10 mm の場合についてガス流速と透過率の関係で整理しなおした。その結果をFig. 8に示す。図中の点線はFig. 2で示したような粒径分布をもつ粉じんが、充填物の 400 mm 層高を通過するときの透過率 c/c_0 を慣性衝突支配として計算した値である。計算は以下の方法によった。いま慣性パラメータを ψ とすると、層厚 L の充填層における透過率は、Schmidtら¹⁾によれば次式により与えられる。

$$\frac{c}{c_0} = \exp \left(-2\psi \frac{\pi L}{0.2D_p} \right) \quad (4)$$

充填層入口ガス中のフライアッシュは、Fig. 2に示すような粒径分布を持つので、各粒径ごとの粒度別透過率をEq. (4)より計算し、これより総合透過率を求めた。この総合透過率を示したものがFig. 8の点線である。

Fig. 8 Comparison of measured dust penetration and calculated by inertial impaction theory

る。この図より明らかなように、流速0.6m/s以下の範囲では測定値と慣性捕集計算値とはその勾配がほぼ一致しており、実測値を慣性捕集計算値に沿って外挿してもよいと考えられる。

その結果、充填物粒径10mmφ、ガス流速0.35m/sでの粉じん透過率は層高 $d_s=0.4$ mに対しておよそ次式で表わすことができる。

$$c/c_0 = 0.3 \quad (5)$$

Eq.(5)はFig.6の結果より、入口粉じん濃度にかかわらず成り立つ。いま、移動層で粒子を移動する際には、本来の粒子移動によって粉じんが粒子とともに下層へ持ち込まれる以外に、対象とする部分の上部に充填されている粒子層に保持されている粉じんの一部が移動による機械的な衝撃によって対象とする部分に落下してくること、および対象とする部分よりガス上流側に充填されている粒子層に保持されている粉じんの一部が移動による粒子の動きによってはがれ、ガスとともに下流へ同伴再飛散することが考えられる。

そこで、これらの効果を考慮して、計算法の補正をおこなう。補正方法は、粉じん保持量 w にたいして、上層より落下してくる率および上流よりガスに同伴されてくる率の2つの補正をおこない、保持率 w およびダスト堆積率 $(1-c/c_0)$ の両者が同時に実測値と合理的に一致するように上記の二つの補正係数をいろいろに変化させたパラメータサーベイを行い、補正係数を決定する方法をとった。

まず、Eqs.(3)および(5)を差分式で表わし、その中に補正項を加えることにより次式が得られる。

$$\{w(I, J) - (1+R)w(I, J-1)\}v \Delta x = \{c(I-1, J) - c(I, J)\}u \Delta y \quad (6)$$

$$c(I, J) = 0.3c(I-1, J) + Kw(I, J)(v \Delta x / u \Delta y) \quad (7)$$

ここで、Eq.(6)における補正係数 R は区分 $[I, J-1]$ にある充填層の粉じん保持量 $w(I, J-1)$ のうち、移動による振動で区分 $[I, J]$ にある充填層に落下する割合、Eq.(7)における補正係数 K は区分 $[I, J]$ にある充填層の粉じん保持量のうち移動による振動によりガスに同伴されて下流に飛散する割合である。

Fig.9は R と K を種々に変化させたときの層内の粉じん保持量 w の分布をEqs.(6), (7)を用いて計算した結果である。粉じん堆積率 $\eta = (1-c/c_0)$ の計算値も表中に示した。粉じん保持量 w および粉じん堆積率 η の両者がともに実測値と比較的良く一致するのは、 $R=0.15$, $K=0.17$ の場合である。すなわち移動による機械的な振動により、堆積している粉じんの約15%が下

Fig. 9 Comparison of measured and calculated dust accumulations on particles of moving packed bed

Fig. 10 Comparison of measured dust concentration in effluent gas with that calculated at the exit of particulate bed

方へ落下し、約7%がガスにより同伴されて下流側へ移動するものと考え、実験事実を比較的良く表わす結果が得られる。

また、Fig.10は同じく $R=0.15$, $K=0.07$ としたときの移動層出口における充填層高さ方向のガス中粉じん濃度分布の計算値である。計算値より求まる平均粉じん濃度は約40mg/Nm³であり、一方出口粉じん濃度の実測値は50mg/Nm³となり、ほぼ一致する。

以上の結果、充填層粉じん堆積量、出口粉じん濃度のいずれの観点から、ここで得られた計算方法によって移動層での粉じん堆積特性を予測することが可能となった。

4. 結 言

比較的大粒径の粒子を充填した直交流型移動層に、粉じん含有ガスを通気した際の、充填粒子層への粉じんの堆積特性を、固定層粒子充填層での粉じん堆積実験の結果を適用して予測することを行い次の結論を得た。

(1) 充填粒子径 5～16mm の固定層充填層では、通気ガス流速が大きくなると、いったん充填層に堆積した

粉じんの再飛散を伴いながら堆積が起きるため、慣性パラメータが大きい場合でも粉じん透過率が高くなる領域がある。

(2) 通気ガス流速が 0.35m/s 程度、充填粒子の移動速度が 0.6m/h 程度の移動層の場合、移動に伴う堆積粉じんの下方への落下、およびガスへの同伴量を補正することにより、固定層の結果を用いて堆積特性を予測することができる。

Nomenclature

c : dust concentration in gas	[g/Nm ³]	of packed particles	[g/m ³]
D_d : dust particle diameter	[m]	u : gas velocity	[m/s]
D_s : defined by Eq. (2)	[m]	v : particle moving velocity	[m/s]
D_p : diameter of packed particle	[m]	x, y : rectangular coordinates	[m]
K : correction factor for reentrained of dust from packed bed accompanied with particle moving	[-]	ϵ : void fraction of packed bed	[-]
L : thickness of packed bed	[m]	η : penetration of dust through packed bed	[-]
R : correction factor for falling dust accompanied with particle moving	[-]	μ : viscosity	[kg/m·s]
w : accumulated dust quantity per unit volume		ρ_d : density of dust	[kg/m ³]
		ϕ : inertia parameter	[-]

References

- 1) Schmidt, E. W., J. A. Gieseke, P. Gelfand, T. W. Lauger and A. Furlong : *J. Air Pollution Control Association*, **28**, 143 (1987)
- 2) Gebhalt, J., C. Roth and W. Stahlhofen : *J. Aerosol Sci.*, **4**, 355 (1973)
- 3) Jackson, S. and S. Calvart : *AIChE J.*, **12**, 1075 (1966)
- 4) Mori, Y. and K. Iinoya : Proceedings of International Symposium Powder Technology, p. 557 (1981)
- 5) Kodama, K. and M. Izumi : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **20**, 364 (1983)
- 6) Wada, K., Y. Nishiyama, N. Hayano and T. Jotaki : *ibid.*, **19**, 522 (1982)

★ 四分法の原稿を募集中!!

会誌がお手もとに届くと、まず「四分法」という方が多いようです
この人気ある四分法に気軽にご投稿されませんか……………
長さは575字以内で内容はできるかぎり粉に関連したものが
望ましいのですが、限定はいたしません。ご投稿を心よりお待ちしております。