気流による粒子再飛散および遠心分離に基づく 粒子-壁間付着力の解析

松坂修二・神村正憲・増田弘昭

京都大学大学院工学研究科 化学工学専攻^{††}

気流による粒子再飛散および遠心分離法をもとに分離機構の解析を行った。実験では、個数基準中位径が 21.8~100.6 μm の 6 種類のガラスビーズを用い、粒子を分離するのに必要な流体抵抗および遠心力を求めた。また、粒子-壁間の接触部に Hertz の弾性変形を仮定して、付着力、重力、分離力のモーメントバランスモデルを立て、実験手法に応じて定式化した。実験で得られた分離力から付着力を求めた結果、実験手法によらずほぼ一致し、モーメントバランスによる解析が妥当であることがわかった。さらに、分離実験で得られた付着力を各種付着力の理論値と比較した結果、ファン・デル・ワールス力とほぼ一致することがわかった。

緒 言

粒子沈着および再飛散現象は、分散・分級・集塵・輸送・粒子サンプリングなど、ほとんどすべてのエアロゾル操作にかかわっており、壁面に沈着した粒子がその状態で保持されるのか、あるいは再飛散するのかによってプロセスは大きく影響を受ける。粒子の飛散開始流速は付着力によって異なるが、再飛散は流体抵抗にも依存するため、粒子の付着力が得られたとしても、直ちに再飛散の予測を行うことはできない。また、付着力や流体抵抗の大きさだけでなく、作用する位置および向きについても考慮されなければならない。筆者らは、壁面付着粒子に働く流体抵抗を解析し、粒子が再飛散するときの壁面気流剪断応力（飛散限界気流剪断応力）が再飛散特性の評価項目になりうることを報告した（Masuda *et al.*, 1992; Matsusaka *et al.*, 1994）。

本報では、粒子再飛散の他に遠心法（Asakawa and Jimbo, 1967; Sano *et al.*, 1984; Kanaoka *et al.*, 1987）を併用して粒子の分離機構を解析するとともに、流体力学的手法をさらに発展させて、流体抵抗から粒子の付着力を求める方法について検討する。

1. 粒子の分離機構

水平板上に付着した球形粒子を分離させるときに働く力の状態を Fig. 1 に示す。ここでは付着力 F_a と重力 F_g が鉛直下向きに、分離力 F_s が水平に働く場合を想定し

ており、粒子と壁の接触部分には半径 a の弾性変形を考える。主な分離機構として、これまでに剪断（すべり）（Zimon, 1982）と曲げ（回転）（Kousaka *et al.*, 1980; Jimbo *et al.*, 1981; Masuda *et al.*, 1985; Wang, 1990; Tsai *et al.*, 1991 a）が考えられており、その概要を以下に記す。

剪断分離モデルでは、粒子は水平方向の分離力 F_s によって壁面を滑りながら移動しはじめると考えており、静止摩擦係数 μ_t を考慮したときの力の均衡は次式で表される。

$$F_s = \mu_t (F_a + F_g) \quad (1)$$

ただし、

$$F_g = \frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p g \quad (2)$$

曲げ分離モデルでは、粒子は力のモーメントによって回転しながら移動しはじめると考えており、その均衡は次式で表される。

$$F_s \left(\frac{D_p}{2} - y^* \right) = (F_a + F_g) a \quad (3)$$

高さ方向の弾性変形 y^* は粒子半径 $D_p/2$ に比べて非常に小さいので、Eq.(3) は次のように近似できる。

$$F_s \approx \frac{2a}{D_p} (F_a + F_g) \quad (4)$$

接触半径 a は Hertz の理論（Timoshenko and Goodier, 1951）を適用すると次式で求められる。

$$a = \left\{ \frac{3}{8} (F_a + F_g) k D_p \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

ここで、 k は弾性特性定数であり、試料粒子と壁それぞれのヤング率 E とポアソン比 ν を次式に代入することにより得られる。

[†] 1997 年 1 月 7 日受理

^{††} 〒 606-01 京都市左京区吉田本町

Fig. 1 Forces acting on a particle adhering to a horizontal wall

Fig. 2 Photomicrographs of a glass bead adhering to the test piece

$$k = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (6)$$

なお、回転を伴う分離でも Eq. (1) を代用することがあるが、その場合の係数 μ_1 は滑りのみが作用するときと比べて著しく小さく、粒子径や接触状態によって変化することを考慮しなければならない。

2. 実験装置および方法

試料粒子は、中位径の異なる 6 種類の球形ガラスビーズ（バリウム・チタネートガラス）であり、いずれも粒子径はよく揃っている。粒子の個数基準中位径および幾何標準偏差を Table 1 に、密度および力学的物性を Table 2 に示す。また、粒子を付着させるステンレス製のテストピース（幅 8 mm × 長さ 35 mm）の力学的物性を Table 3 に示す。粒子およびテストピースの表面粗さ（中

Table 1 Count median diameter and geometric standard deviation of test particles

$D_{p50} [\mu\text{m}]$	21.8	29.3	48.9	57.4	80.7	100.6
$\sigma_g [-]$	1.11	1.07	1.04	1.04	1.03	1.03

Table 2 Properties of the particles

Material	Barium-Titanate Glass
Particle density ρ_p [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	4,150
Young's modulus E_1 [Pa]	7.5×10^{10}
Poisson's ratio ν_1 [-]	0.21

Table 3 Properties of the test piece

Material	Stainless steel
Young's modulus E_2 [Pa]	1.9×10^{11}
Poisson's ratio ν_2 [-]	0.29

心線平均粗さ）は、原子間力顕微鏡（東洋テクニカ、Nano Scope IIIa）で測定した結果、ガラスビーズは 0.2 nm 以下、テストピースは 0.2 ~ 1 nm 程度であった。テストピースの表面は粒子を付着させる前にエタノールで洗浄して自然乾燥させ、粒子径より少し目開きの大きい標準ふるいを用いて粒子をテストピース上に散布した。このときの粒子の面積占有率（表面に対する全粒子の投影面積の割合）は 1% 未満であり完全分散に近いが、粒子同士が接触しているものについては計測対象から除外した。参考として、テストピースに付着している試料粒子の SEM 写真を Fig. 2 に示す。

再飛散実験装置は、既報（Masuda *et al.*, 1992 ; Matsusaka *et al.*, 1994）と同じく、幅 8 mm × 高さ 1 mm の矩形流路（内部が観察できるように上部は透明ガラス製）であり、粒子を付着させたテストピースを 100 mm の助走区間の後ろに流路の内壁面と一致するように固定した。空気流速は 0 から $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ まで徐々に増加させて粒子が再飛散していく様子をビデオカメラで撮影し、各流速における残留粒子を計数した（各試料の計測対象粒子数：251 ~ 455）。

遠心分離実験では、回転時の気流の影響で粒子が飛散しないようにテストピースを密閉容器に入れ、回転半径 180 mm の位置に固定して、回転数を増加させては残留粒子を計数した（周速度：2 ~ $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、各試料の計測対象粒子数：256 ~ 335）。本装置では、テストピースは水平面上を回転するが、粒子付着面を水平上向きあるいは円周外向きに固定することによって、遠心力は接線方向にも法線方向にもかけられる。なお、環境条件は温度 20 ~ 25°C 、関係湿度 40 ~ 50% の範囲であった。

Fig. 3 Experimental results of particle reentrainment

Fig. 4 Relationship between critical reentrainment velocity $\bar{u}_c$ and particle diameter D_p

3. 実験結果および考察

3.1 再飛散および遠心分離の結果

Fig. 3に、中位径の異なる6種類のガラスビーズを用いたときの再飛散実験の結果を示す。飛散率 η （飛散粒子数/全粒子数）は平均流速 $\bar{u}$ とともに増加しており、個々の粒子の飛散開始流速に分布がみられる。そこで、飛散率50%に対応する平均流速を粒子径 D_{p50} の飛散開始流速とし、Fig. 4に飛散開始流速 $\bar{u}_c$ と粒子径 D_p の関係を示した。飛散開始流速は粒子径の増加にともなって減少しており、飛散しやすくなることがわかる。

遠心分離実験の結果についても分離率50%に対応する周速度を粒子径 D_{p50} の分離限界周速度とし、Fig. 5に分離限界周速度 $L\omega_c$ と粒子径 D_p の関係を示した。分離限界周速度は粒子径の増加にともなって小さくなっており、Fig. 4と同様の傾向にある。また、同じ粒子径では、接線方向よりも法線方向に遠心力が働くときの方が、粒子は分離されにくいこともわかる。

3.2 粒子に働く分離力

再飛散実験において壁近傍は剪断流れ場であり、高さ y によって流速が変化する。そこで、壁面上の球形粒子の微小高さ dy に働く流体抵抗 dF_D を次のように近似する

Fig. 5 Relationship between critical separation circumferential speed $L\omega_c$ and particle diameter D_p

(Kousaka *et al.*, 1980 ; Matsusaka *et al.*, 1996 a,b).

$$dF_D(y) = C_D(y) \frac{\rho \{u(y)\}^2}{2} dA_p(y) \quad (7)$$

ここで、 C_D は粒子の抵抗係数、 ρ は空気密度、 u は流速、 A_p は粒子の投影面積である。本実験では扁平矩形流路を用いており、Fig. 4の結果に対応する流れは層流($Re = \rho \bar{u}_c h / \mu = 165 \sim 1,350$)で、粒子まわりの流れはアレン域($Re_p = 1.9 \sim 4.7$)であり、抵抗係数はアレン域を含む幅広い粒子レイノルズ数($Re_p = 10^{-1} \sim 10^4$)で実験結果とよく一致する次式(Morishima, 1979)から求める。

$$C_D(y) = \frac{24}{Re_p(y)} \left\{ \frac{7}{8} + \frac{1}{4} \sqrt{Re_p(y)} + \frac{7}{600} Re_p(y) \right\} \quad (8)$$

ここで、 $Re_p(y)$ は剪断流れ場を考慮して次式で表す。

$$Re_p(y) = \frac{\rho u(y) D_p}{\mu} \quad (9)$$

$u(y)$ は、次の2次元ポアズイユの流れを適用する。

$$u(y) = 6\bar{u} \left\{ \frac{y - y^*}{h} - \left(\frac{y - y^*}{h} \right)^2 \right\} \approx 6\bar{u} \left\{ \frac{y}{h} - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

また、 $dA_p(y)$ は次式で与えられる。

$$dA_p(y) = 2\sqrt{y(D_p - y)} dy \quad (11)$$

したがって、粒子に働く流体抵抗 F_D は、Eqs.(8)～(11)をEq.(7)に代入し、次式のように高さ方向に積分することによって求められる。

$$F_D = \int_{y^*}^{D_p} dF_D(y) \approx \int_0^{D_p} dF_D(y) \quad (12)$$

一方、遠心力 F_{ct} は回転半径を L 、回転角速度を ω とすると次式で求められる。

$$F_{ct} = \frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p L \omega^2 \quad (13)$$

Fig. 6 Comparison of separation force

Fig. 6に、飛散開始流速 $\bar{u}_c$ の実験結果から求めた流体抵抗 F_D および分離限界角速度 ω_c から求めた遠心力 F_{ct} を示す。いずれも粒子径とともに分離力が増加するという傾向は一致するが、同一粒子径での分離力は大きく異なる。これは、粒子に働く力の向きおよび作用する位置がそれぞれ異なることに起因しており、分離力の評価を行うためには分離機構を解析しなければならない。

3.3 剪断分離モデルと曲げ分離モデルの比較

剪断分離力と曲げ分離力の比の値 r は Eqs. (1), (2), (4), (5) から次式のように表せる。

$$r = \frac{\mu_t (F_a + F_g)}{2a (F_a + F_g)} = \frac{\mu_t D_p}{2a} \quad (14)$$

$$= \mu_t \left\{ \frac{D_p^2}{3k \left(F_a + \frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p g \right)} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

静止摩擦係数 μ_t は、試料粒子が回転しないように顕微鏡用カバーガラスの片面に両面粘着テープを用いて粒子1層分を固定し、粒子層を下向きにしてテストピース上に載せ、これを傾斜させて滑りはじめるときの傾斜角から求めた。その結果、6種類の試料粒子の μ_t は粒子径によらず 0.26 ± 0.01 となった。弾性特性定数 k は、Tables 2, 3の力学的物性値を Eq. (6) に代入すると $1.76 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$ となる。また、粒子密度 ρ_p は $4,150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ である。これらの物性値を Eq. (14) に代入して求めた剪断分離力と曲げ分離力の比の値 r を Fig. 7 に示す。同図の実線は、付着力 F_a をパラメータとして計算しており、 r は付着力が支配的な領域では粒子径の $2/3$ 乗に比例して増加するが、重力が支配的になると粒子径の $1/3$ 乗に反比例する。この計算では、付着力は粒子径に対して独立に扱ったが、実際には付着力の粒径依存性を考慮する必要がある。付着力の評価は、§ 3.5で行うが、ここでは次式

Fig. 7 Relationship between ratio of shearing separation force to bending separation force r and particle diameter D_p

で表される剛体球-平板間のファン・デル・ワールス力を用いて計算してみる。

$$F_v = \frac{AD_p}{12z^2} \quad (15)$$

ここで、 A は Hamaker 定数、 z は有効表面間距離である。試料粒子およびテストピースの Hamaker 定数が既知であれば、それらの幾何平均値として Eq. (15) の Hamaker 定数を推定できるが、それらの正確な値を求めることは難しいので、ここでは鉱物系および金属系の平均的な値 (Visser, 1972) を参考にして、 $A = 2 \times 10^{-19} \text{ J}$ とする。 z は表面が滑らかであれば 0.4 nm 程度であるが、表面粗さ (§ 2 の実測値を参照) の影響 (Czarnecki et al. 1980, 1984) を考慮して 1 nm の場合も考えてみる。これらの値を用いて計算した結果を同図の破線で示す。本実験で用いた試料粒子 (中位径 $21.8 \sim 100.6 \text{ μm}$) に対応する r の値は 1 より十分大きく、剪断分離の方が曲げ分離よりも大きな力を必要とすることがわかる。すなわち、実際の分離は小さな力で分離させることのできる曲げ分離によって起こることになる。

3.4 曲げ分離モデルによる力の解析

壁面付着粒子に働く流体抵抗のモーメント M は、Eq. (12) と同様の手法を用いると次のようになる。

$$M = \int_{y^*}^{D_p} (y - y^*) dF_D(y) \quad (16)$$

$$\approx \int_0^{D_p} y dF_D(y)$$

また、遠心場において接線方向に分離力が働くときのモーメント M は次式で与えられる。

$$M = F_{ct} \left(\frac{D_p}{2} - y^* \right) \quad (17)$$

$$\approx F_{ct} \frac{D_p}{2} = \frac{\pi}{12} D_p^4 \rho_p L \omega^2$$

Fig. 8 Adhesive force based on a bending model

Fig. 9 Forces acting on a particle adhering to a vertical wall

さて、Eq.(3) の左辺をモーメント M で表し、これに Eqs.(2), (5) を代入すると、付着力 F_a は次のように表せる。

$$F_a = \left(\frac{8M^3}{3kD_p} \right)^{\frac{1}{4}} - \frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p g \quad (18)$$

Eq.(18) に、Eq.(16) あるいは Eq.(17) を代入して求めた付着力 F_a を Fig. 8 に示す。異なる測定法で得られた付着力はオーダーさえ合わないことが多いが、粒子の再飛散から求めた付着力 (○) と遠心法から求めた付着力 (●) は比較的良好一致した。また、Fig. 8 には Fig. 6 で得られた法線方向の遠心力を併記してある。従来、法線方向に遠心力を加えたときには、分離時の遠心力は付着力と向きが反対で大きさが等しいものとして扱われているが (Asakawa and Jimbo, 1967; Sano *et al.*, 1984; Kanaoka *et al.*, 1987)、曲げモデルにより求めた付着力の結果に比べて1オーダー以上も小さいことがわかる。

以下では、法線方向の遠心分離実験の結果にも曲げモデルを適用して付着力を求めてみる。鉛直板に付着した粒子に対して法線方向に遠心力が働くときの状態を Fig. 9 に示す。粒子の半径に比べて弾性変形が十分小さいとき、モーメントバランスは次式で近似される。

Fig. 10 Comparison of adhesive force

$$F_{ct}a + F_g \frac{D_p}{2} \approx F_a a \quad (19)$$

重力は、水平板上では付着力と同じ向きに働くが、鉛直板では分離力として働くことになる。一般に、微粒子では付着力に比べて重力は小さいが、粒子半径 $D_p/2$ に比べて接触半径 a は非常に小さいので、重力のモーメントは相対的に大きくなる。このとき、粒子を壁面に押しつける力は付着力だけであり、接触半径 a は Eq.(5) で $F_g=0$ とすることにより次式となる。

$$a = \left(\frac{3}{8} F_a k D_p \right)^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

Eqs.(2), (19), (20) から、粒子の付着力 F_a は次式で表せる。

$$F_a^4 - 3F_{ct}F_a^3 + 3F_{ct}^2F_a^2 - F_{ct}^3F_a - \frac{(\pi\rho_p g)^3 D_p^{11}}{648k} = 0 \quad (21)$$

Eq.(21) に F_{ct} の実験値を代入して得られた付着力 F_a (▲) および Fig. 8 の曲げモデルによる付着力 (●, ○) を Fig. 10 に示す。Fig. 8 と比べて▲印は他の二つの実験結果に近づいており、法線方向に遠心力を加えたときにも曲げモデルを適用して付着力を求めることが有効であることがわかった。

3.5 付着力の評価

一般に、粒子の付着力として、ファン・デル・ワールス力、静電気力等が考えられ、これらの付着力と本実験で得られた付着力とを比較してみる。なお、液架橋力については実験時の関係湿度が50% 以下であったため対象から除外した。

剛体球-平板間のファン・デル・ワールス力は、Eq.(15) で表されるが、これは弾性変形のない理想状態を仮定している。しかし、実際には粒子-平板間の接触部に弾性変形が生じており、粒子を法線方向に引き離すときの

分離力にその影響が現れる。この分離力の大きさが、いわゆる弾性変形を考慮したときの付着力であり、これまでに幾つかのモデルが提案されてきた (Johnson *et al.*, 1971; Dahneke, 1972; Derjaguin *et al.*, 1975; Muller *et al.*, 1980; Tsai *et al.*, 1991 b)。弾性変形の生じた部位には付着力の他に反発力も働き、力の分布の取り扱いが各モデルで違うため誘導される結果も異なる。Tsai ら (1991 b) は既存モデルの問題点を指摘したうえで新たなモデルを提案しており、弾性変形を考慮した付着力 F_{vd} を次式で表した。

$$F_{vd} = \frac{AD_p}{12z^2} [0.5 \exp\{0.124(\Pi - 0.05)^{0.439}\} + 0.2\Pi] \quad (22)$$

ただし、

$$\Pi = \left(\frac{25A^2 D_p k^2}{512z^7} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (23)$$

ここでは、ファン・デル・ワールス力を Eq. (15) および Eq. (22) を用いて計算してみる。それぞれの定数は、Eq. (15) の計算と同様に $A = 2 \times 10^{-19}$ J, $z = 0.4$ nm および 1 nm, $k = 1.76 \times 10^{-11}$ Pa $^{-1}$ とする。

また、粒子-金属壁間の静電気力として電気影像効果による付着力は次式で表される。

$$F_{el} = \frac{\alpha q^2}{4\pi\epsilon_0 D_p^2} \quad (24)$$

ここで、 ϵ_0 は空気誘電率 (8.85×10^{-12} F $\cdot$ m $^{-1}$)、 q は粒子1個の帯電量、 α は電界の集中に対する補正係数である。試料粒子をテストピースに分散・付着させるときと同じ方法で、ファラデーケージ内に自由落下させて得られた平均帯電量は 1.5×10^{-17} C ($D_{p50} = 48.9$ μ m, $q/m_p = 0.059$ μ C $\cdot$ kg $^{-1}$) と非常に小さい。また、補正係数 α は $1 \sim 10$ 程度である。

Hertz の理論に基づく接触帯電付着力 (Masuda, 1990) は次式で表される。

$$F_{ce} = \frac{\pi\epsilon_0 V_c^2}{2z^2} \left(\frac{3F_a k D_p}{8} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (25)$$

ここで、 V_c はガラスビーズとテストピースの接触電位差で、ケルビン法 (Itakura *et al.*, 1996) によって得られた値は 0.09 V であった。なお、粒子の付着力 F_a には Eq. (22) を代入する。

これらの付着力および重力の計算結果を Fig. 10 に併せて示す。ただし、電気影像効果による静電気力は $\alpha = 10$ にしても非常に小さかったため、Fig. 10 には表示できなかった。同図から分かるように、本実験での主要な付着力はファン・デル・ワールス力であり、分離実験によって得られた付着力とほぼ一致した。有効表面間距離 z はほぼ $0.4 \sim 1$ nm の範囲内であり、妥当な結果と考えられ

る。なお、計算結果によるとファン・デル・ワールス力に及ばず弾性変形の影響は、有効表面間距離の影響に比べてあまり大きくはなかった。

結 言

球形ガラスビーズの再飛散実験および遠心分離実験の結果を分離機構を考慮して解析した。得られた結論は以下のとおりである。

1) 球形粒子が外力を受けて壁面から分離するときの機構として、摩擦を考慮した剪断分離モデルとモーメントバランスを考慮した曲げ分離モデルが考えられるが、本実験条件に合わせて比較検討した結果、曲げ分離モデルの方が有効であることがわかった。

2) 曲げ分離モデルでは、粒子と壁の接触部分に弾性変形を考慮しており、Hertz の接触半径を支点とする力のモーメントバランスによって、再飛散および遠心法で得られた分離力から粒子の付着力を求めることができる。

3) 従来、法線方向の遠心力から付着力が直接求められると考えられていたが、この場合にもモーメントバランスを用いなければならないことがわかった。

4) 分離力から求めた付着力はファン・デル・ワールス力の推算値とほぼ一致した。

[謝 辞] 球形ガラスビーズは、株式会社ユニオンからご提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

Nomenclature

A	= Hamaker constant	[J]
A_p	= projected area of a particle	[m 2]
a	= contact radius	[m]
C_D	= drag coefficient of a particle	[—]
D_p	= particle diameter	[m]
D_{p50}	= count median diameter	[m]
E	= Young's modulus	[Pa]
F_a	= adhesive force	[N]
F_{ce}	= electrostatic force based on contact potential difference	[N]
F_{ct}	= centrifugal force	[N]
F_D	= drag force	[N]
F_{el}	= electric image force	[N]
F_g	= gravitational force	[N]
F_s	= separation force	[N]
F_v	= van der Waals force without considering elastic deformation	[N]
F_{vd}	= van der Waals force considering elastic deformation	[N]

g	=gravitational acceleration	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
h	=height of a channel	$[\text{m}]$
k	=constant of elastic property	$[\text{Pa}^{-1}]$
L	=radius of gyration	$[\text{m}]$
M	=moment	$[\text{N}\cdot\text{m}]$
q	=electric charge of a particle	$[\text{C}]$
q/m_p	=charge-to-mass ratio of particles	$[\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}]$
Re	=Reynolds number	$[-]$
Re_p	=particle Reynolds number	$[-]$
r	=ratio of shearing separation force to bending separation force	$[-]$
u	=air velocity	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
$\bar{u}$	=average air velocity	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
$\bar{u}_c$	=critical reentrainment velocity	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
V_c	=contact potential difference	$[\text{V}]$
y	=distance from a wall	$[\text{m}]$
y^*	=deformation at the contact area of a particle	$[\text{m}]$
z	=effective gap between contact bodies	$[\text{m}]$
α	=coefficient in Eq. (24)	$[-]$
ϵ_0	=permittivity of air	$[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$
η	=reentrainment efficiency	$[-]$
μ	=viscosity	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
μ_t	=statical friction coefficient	$[-]$
ν	=Poisson's ratio	$[-]$
Π	=coefficient in Eq. (22)	$[-]$
ρ	=air density	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ρ_p	=particle density	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
σ_g	=geometric standard deviation of particle size distribution	$[-]$
ω	=angular velocity	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$
ω_c	=critical angular velocity	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$

Literature cited

Asakawa, S. and G. Jimbo; "Measurement of Adhesion Force of Powder Particles to Solid Surfaces by Centrifugal Method," *J. Soc. Materials Sci., Japan*, **16**, 358-363 (1967)

Czarnecki, J. and T. Dabros; "Attenuation of the van der Waals Attraction Energy in the Particle/Semi-Infinite Medium System Due to the Roughness of the Particle Surface," *J. Colloid Interface Sci.*, **78**, 25-30 (1980)

Czarnecki, J. and V. Itschenskij; "Van der Waals Attraction Energy between Unequal Rough Spherical Particles," *J. Colloid Interface Sci.*, **98**, 590-591 (1984)

Dahneke, B.; "The Influence of Flattening on the Adhesion of Particles," *J. Colloid Interface Sci.*, **40**, 1-13 (1972)

Derjaguin, B. V., V. M. Muller and Y. P. Toporov; "Effect of Contact Deformations on the Adhesion of Particles," *J. Colloid Interface Sci.*, **53**, 314-326 (1975)

Itakura, T., H. Masuda, C. Ohtsuka and S. Matsusaka; "The Contact Potential Difference of Powder and the Tribo-charge," *J. Electrostatics*, **38**, 213-226 (1996)

Jimbo, G., R. Yamazaki and G. Hong; "The Development of New Measuring Methods of Powder Particle and Powder Bed," *Rep. Asahi Glass Found. Ind. Technol.*, **38**, 123-134 (1981)

Johnson, K. L., K. Kendall and A. D. Roberts; "Surface Energy and the Contact of Elastic Solids," *Proc. R. Soc. Lond. A*, **324**, 301-313 (1971)

Kanaoka, C., H. Emi, N. Kikukawa and T. Myojo; "The Detachment of Fine Particles from a Wall Surface," *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **24**, 233-239 (1987)

Kousaka, Y., K. Okuyama and Y. Endo; "Re-entrainment of Small Aggregate Particles from a Plane Surface by Air Stream," *J. Chem. Eng. Japan*, **13**, 143-147 (1980)

Masuda, H., S. Matsusaka and S. Ikumi; "Particle Reentrainment from Powder Bed of Fine Particles in a Rectangular Air-flow Channel," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **11**, 48-54 (1985)

Masuda, H.; "Electrification and Adhesion Phenomena of Powder Particles," *Kagaku Kogaku*, **54**, 431-436 (1990)

Masuda, H., S. Matsusaka and K. Imamura; "A New Method for the Measurement of Powder Characteristics Based on the Reentrainment Phenomena," *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **29**, 897-905 (1992)

Matsusaka, S., K. Mizumoto, M. Koumura and H. Masuda; "Evaluation of Adhesive Strength Distribution Based on Reentrainment Phenomena-Discrimination between Particle-Particle and Particle-Wall Interaction-," *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **31**, 719-725 (1994)

Matsusaka, S. and H. Masuda; "Particle Reentrainment from a Fine Powder Layer in a Turbulent Air Flow," *Aerosol Sci. Technol.*, **24**, 69-84 (1996 a)

Matsusaka, S., K. Fujita and H. Masuda; "Particle Reentrainment under Reduced Pressure," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **22**, 177-183 (1996 b)

Morishima, N.; "Comparisons among Approximate Equations of Drag Coefficient for a Sphere," *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **16**, 117-124 (1979)

Muller, V. M., V. S. Yushchenko and B. V. Derjaguin; "On the Influence of Molecular Forces on the Deformation of an Elastic Sphere and Its Sticking to a Rigid Plane," *J. Colloid Interface Sci.*, **77**, 91-101 (1980)

Sano, S., F. Saito and S. Yashima; "Measurement of Forces of Adhesion of Powders to Glass Plate by Centrifugal Method," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **10**, 17-24 (1984)

Timoshenko, S. P. and J. N. Goodier; *Theory of Elasticity*, Chapt. 12, McGraw-Hill, New York, USA (1951)

Tsai, C.-J., D. Y. H. Pui and B. Y. H. Liu; "Particle Detachment from Disk Surfaces of Computer Disk Drives," *J. Aerosol Sci.*, **22**, 737-746 (1991 a)

Tsai, C.-J., D. Y. H. Pui and B. Y. H. Liu; "Elastic Flattening and Particle Adhesion," *Aerosol Sci. Technol.*, **15**, 239-255 (1991 b)

- Visser, J. ; "On Hamaker Constants : A Comparison between Hamaker Constants and Lifshitz-van der Waals Constants," *Advan. Colloid Interface Sci.*, **3**, 331-363 (1972)
- Wang H. C. ; "Effects of Inceptive Motion on Particle Detachment from Surfaces," *Aerosol Sci. Technol.*, **13**, 386-393 (1990)
- Zimon, A. D. ; Adhesion of Dust and Powder, p.307-319, Consultants Bureau, New York, USA (1982)

Analysis of Adhesive Force between Particle and Wall Based on Particle Reentrainment by Airflow and Centrifugal Separation

Shuji Matsusaka, Masanori Koumura and Hiroaki Masuda

Department of Chemical Engineering, Kyoto University, Kyoto 606-01

Key Words: Particle Reentrainment, Centrifugal Separation, Adhesive Force, Separation Force, Moment Balance

The mechanism of particle separation was analyzed by use of the methods of particle reentrainment by airflow and centrifugal separation. Glass beads of six different sizes in a range of 21.8-100.6 μm in count median diameter were used, and the drag and centrifugal forces for particle separation were obtained experimentally. A moment balance model based on adhesive, gravitational, and separational forces was presented on an assumption of Hertzian deformation in a particle-wall contact zone. The model corresponding to each experimental method was formulated, and adhesive force was calculated from the separation force. It was found that the values of the adhesive force agreed with each other irrespective of the experimental methods, showing the analysis based on the moment balance was more reliable. Furthermore, the values of adhesive force obtained from the experiments were compared with various theoretical ones, and it was found that the adhesive force agreed approximately with van der Waals force.