

微粒子の振動輸送の解析[†]

小早川 昔離野・松坂 修二^{††}

京都大学大学院工学研究科 化学工学専攻, 615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂

キーワード: 振動輸送, 微粒子, 跳躍, 流体抵抗, 付着力

振動コンベヤは, 粒子を跳躍移動させる傾斜振動トラフを備えた装置であり, 固体材料の輸送用に産業で広く用いられている。しかし, 粒子にはたらく付着力や流体抵抗の基礎的検討は行われておらず, 微粒子を対象とした振動輸送を詳細に説明する報告は見当たらない。本報では, 二次元振動する平板上の微粒子の挙動に関する最新の実験的および理論的研究の成果をまとめて記す。平板に付着した粒子に十分な強度の二次元振動を加えると, 粒子は平板から分離して跳躍を繰り返すが, 平板に対して接線方向に外力を加えると粒子は回転し始め, これにともなうて, 粒子・平板間相互作用力が著しく低下するので, 比較的小さい外力でも粒子は平板から分離する。また, 粗粒子は一次粒子として前後に大きく跳躍しながら移動するのに対し, 微粒子は反発係数の小さい凝集粒子を容易に形成し, 微小な跳躍を一定方向に繰り返すので, 凝集粒子の平均移動速度は粗粒子に比べて大きくなる。これらの現象は, 理論的確率モデルおよび粒子軌跡の数値シミュレーションによって説明できる。

結 言

粒子を充填した容器に振動を加えて, 粒子-粒子間, 粒子-壁間にはたらく力の均衡を崩すと流動化が始まる。この振動流動現象は, 粉体の供給 (Matsusaka *et al.*, 1995, 1996; Takano and Tomikawa, 1998; Yang and Evans, 2003, 2004; Mracek and Wallaschek, 2005; Matsusaka *et al.*, 2012a, 2012b), 流動層 (Mori *et al.*, 1989; Tatemoto *et al.*, 2001; Mawatari *et al.*, 2002; Matsusaka *et al.*, 2013; Mizutani *et al.*, 2013; Zhou *et al.*, 2013), 流動特性評価 (Jiang *et al.*, 2006, 2009; Ishii *et al.*, 2011; Zainuddin *et al.*, 2012) に応用されている。また, 二次元振動トラフによって粒子層を跳躍移動させる振動輸送 (Gallas *et al.*, 1992; Rademacher and Borg, 1994; Slood and Kruyt, 1996; Simsek *et al.*, 2008) は, 産業で広く利用されており, 輸送量を増やすために, 多量の粒子がトラフに積載されている。粒子同士の接触によって, 個々の粒子の自由な運動が妨げられると, 粒子層あるいは粒子群として平板上を跳躍するようになり, 振動輸送の解析的研究においても, 粒子層をひとつの非弾性体とみなして, 輸送速度の推算が行われてきた (Rademacher and Borg, 1994; Slood and Kruyt, 1996)。

一方, 個々の粒子の運動を対象とする基礎研究は, 一次元振動平板上の物理現象として理学的見地から行われてきた (Feng and Graff, 1972; Wood and Byrne, 1981; Clement *et al.*, 1993; Luding *et al.*, 1994; Warr and Huntley, 1995; Geminard and Laroche, 2003)。特に, Clement *et al.* (1993) および Luding *et al.* (1994) は, 振動加速度, 粒子数, および反発係数が流動状態に与える影響を検討し, エネルギーの供給よりも粒子の非弾性衝突によるエネルギーの散逸が多くなると, 個々の粒子の運動から粒子層の運動に移行することを報告した。しかし, 振動平板上の粒子挙動に関する研究は,

そのほとんどが数百マイクロン以上の比較的流動しやすい大きい粒子 (粗粒子) を対象にしており, 重力よりも付着力や流体抵抗が支配的な微粒子を想定したものではない。

微粒子の振動輸送に関係する精密ハンドリングの基盤技術を確立するには, 一次元振動ではなく, 二次元振動する平板上の粒子の挙動を解明する必要がある。十分な強度の二次元振動を加えると, 平板に付着した微粒子は平板から分離して跳躍を繰り返すが, 詳細な物理現象の解明には, 粒子の微視的観察および理論的解析が必要である。

本報では, 一次元振動平板上の粒子挙動の基礎的知見を踏まえて実施された二次元振動平板上の微粒子の挙動に関する著者らの最近の実験的および理論的研究の成果をまとめて, 微粒子の振動輸送に関する統一的な考え方を示す。特に, 力のモーメントの均衡に基づく粒子の分離機構および微粒子の特異な跳躍運動におよぼす衝突速度, 反発係数, 流体抵抗の影響を詳細に記す。

1. 分離挙動の微視的解析

1.1 壁に付着した粒子の分離

粒子が壁と接触すると, ファンデルワールス力, 静電気力, 液架橋力などの付着力を受ける。壁に付着した微粒子を分離するには, 付着力を上回る分離力を粒子に加える必要がある。主な分離法には, (1)遠心法 (Sano *et al.*, 1984; Matsusaka *et al.*, 1997; Salazar-Banda *et al.*, 2007), (2)振動法 (Mullins *et al.*, 1992; Theerachaisupakij *et al.*, 2002; Hubbard *et al.*, 2012; Kobayakawa *et al.*, 2015a), (3)気流法 (Kousaka *et al.*, 1980; Tsai *et al.*, 1991; Matsusaka and Masuda, 1996; Matsusaka *et al.*, 1997; Jiang *et al.*, 2008; Maniero *et al.*, 2012), (4)エアロゾル粒子による衝突分離法 (Theerachaisupakij *et al.*, 2002, 2003; Liu *et al.*, 2011, 2012) などがあり, 粒子にはたらく付着力や分離力の向き, 大きさ, 状態の違いによって, 幾つかの力学モデルが提案されてきた。たとえば, 真球は平面と一点で接触するが, 実際には, 接触部の変形により面で接触したり, 形状や表面粗さによって多点で接触したりするので, 力の向きや作用点

[†] 2015年0月0日

DOI: 0000000000

^{††} matsu@cheme.kyoto-u.ac.jp

を考慮した剛体モデルによる解析が必要である。分離機構として、並進運動のみによる分離モデルと回転運動をともなう分離モデルが提案されているが、球形粒子では回転を考慮した力のモーメントに基づく解析の方が実際の現象によく合う (Kousaka *et al.*, 1980; Wang, 1990; Tsai *et al.*, 1991; Matsusaka *et al.*, 1997; Soltani and Ahmadi, 1994; Soltani *et al.*, 1995). しかし、粒子が回転しても分離に至るまでの動的な過程は十分に解明されておらず、粒子の微視的観察が必要不可欠である。

1.2 分離挙動の観察

Figure 1 に、二次元振動平板 (SUS304, 平均粗さ $Ra=0.27 \mu\text{m}$) 上の粒子 (球形ジルコニア, $D_{p50}=57 \mu\text{m}$) の分離過程を高倍率ズームレンズ付き高速カメラで振動方向の側方から撮影した画像を示す。ここで、振動位相ゼロは、平板上の粒子が動き始める起点であり、平板の振動に合わせて $1/4$ 位相毎に静止画像を抜粋した (Kobayakawa *et al.*, 2015a)。また、水平方向を x 軸、鉛直方向を z 軸とし、 x 軸の正の方向を前方、負の方向を後方と定義する。平板の表面は、図中の水平線であり、 x 軸および z 軸ともに平板は同位相で正弦振動する (すなわち、平板が上昇するとき前方に移動し、下降するとき後方に移動する)。図中の水平線の下に見られる上向きの矢印は、粒子と平板の初期の付着位置を示す。破線の矢印は粒子の回転方向を示す。すなわち、粒子は回転によって初期の付着位置よりも前方あるいは後方に移動することがわかる。平板は、 $0-\pi$ rad において後方に下降するが、粒子は慣性と摩擦力によって前方に転がる。 π rad で振動平板の移動方向が反転すると、粒子は後方に転がり始め、 2π rad では粒子は回転しながら平板から分離して跳躍する。

Figure 2 は、画像処理ソフトで平板と粒子の位置を追跡して得られた結果であり、Figure 2(a)は水平方向、Figure 2(b)は鉛直方向の変位を示す (Kobayakawa *et al.*, 2015a)。図中の実線と破線は、それぞれ平板と粒子に対応しており、粒子は半径ゼロの質点で表示されている。水平方向および鉛直方向ともに、変位ゼロは平板の振動の中心に相当する。図の右側には、平板の変位に対応する振動加速度を併記してある。Figure 2(a) において 2π rad の平板の変位が振動位相ゼロに比べて大きいのは、粒子の動き始めを捉えるために、平板の振幅が時間とともに少しずつ増加する非定常条件下で実験が行われたためである。振動位相ゼロより前では、粒子は平板に付着しており、粒子の変位は平板の変位と等しい。位相ゼロの振動加速度 α_x は、 -80 m/s^2 であり、粒子は慣性によって平板上を前方に転がるので、粒子の変位の低下は平板よりも遅れる。

Figure 2(b) に示す粒子の鉛直方向の変位は、約 $3\pi/2$ rad まで平板の変位と等しいので、粒子は平板と接触しているが、これ以降、粒子は平板から分離し、慣性によって跳躍する。なお、粒子と平板の速度解析から求めた分離時の鉛直方向の振動加速度 α_z は -10 m/s^2 である。

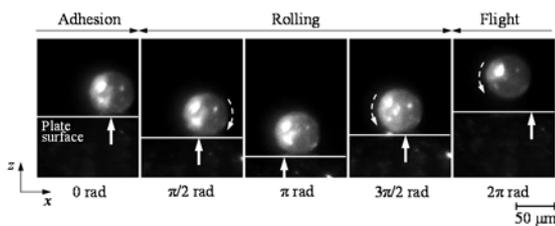


Fig. 1 Snapshots of the process of particle detachment from the oscillating plate during one oscillation cycle (frequency of vibration: 280 Hz)

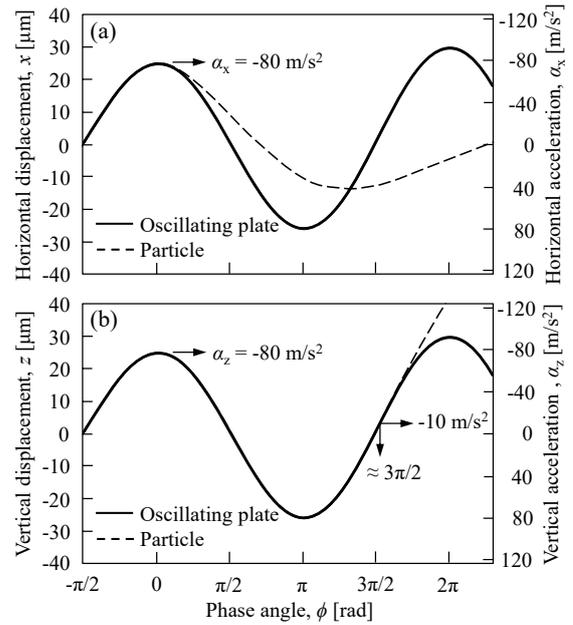


Fig. 2 Trajectories of the oscillating plate and the particle as a function of the phase angle of the oscillation: (a) Horizontal displacement and (b) Vertical displacement

m/s^2 である。

Figure 2(b) に示したように、位相ゼロで鉛直方向の加速度 α_z が -80 m/s^2 まで粒子は平板に付着し続けたが、分離時の振動加速度 α_z は -10 m/s^2 であるので、粒子が平板上を転がると付着力が著しく減少したことになる。また、この分離時の振動加速度は重力加速度 (-9.8 m/s^2) にほぼ等しいので、重力を超える分離力が粒子に作用すれば、粒子は平板から分離可能となる。

1.3 付着力、分離力および表面粗さに基づく力学モデル

前節で示した粒子挙動を力学的に解析するために、並進および回転の2つの力学モデルを用いる。Figure 3 に、微小な表面粗さが存在する平板に付着した球形粒子にはたらく力の状態を模式的に示す。ここでは、付着力 F_a と重力 F_g のほかに、振動による分離力の水平成分 F_{sx} と鉛直成分 F_{sz} を考慮しており、多点接触に起因する接触半径 a を考える。

鉛直方向の分離力によって、粒子が平板から跳躍を開始する場合、力の均衡は次式となる。

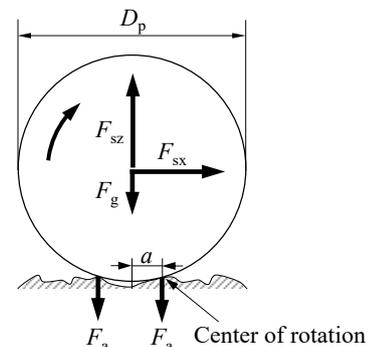


Fig. 3 Forces acting on a particle adhering to the obliquely oscillating surface

$$2F_a + F_g = F_{sz} \quad (1)$$

一方、回転による力のモーメントに基づく均衡は次式で表される。

$$2F_a + F_g = \left[\sqrt{\left(\frac{D_p}{2a}\right)^2} - 1 \right] F_{sx} + F_{sz} \quad (2)$$

左辺の付着力と重力のモーメントの和に比べて、右辺の分離力のモーメントの和が大きくなると、粒子は回転し始める。

上記二つの式を比較すると、Eq. (2) の右辺第1項、すなわち水平成分の分離力の寄与によって、粒子は跳躍よりも小さな分離力で回転することがわかる。次に、回転運動にともなって付着力が減少する理由を考える。一般に、付着力は、ファンデルワールス力、静電気力、液架橋力に起因するが、相対湿度が低く、表面の電荷が小さいとき、ファンデルワールス力が支配的になり、付着力は次式で表される。

$$F_a = \frac{AD_p}{12z_0^2} \quad (3)$$

ここで、 A はハマーカー定数、 z_0 は表面間距離であり、付着状態の表面間距離は $z_0 \approx 0.4 \text{ nm}$ である。付着力は表面間距離 z_0 の2乗に反比例するので、粒子が平板上を転がる間に表面間距離が数十 nm まで増加したと考えると、付着力は数万分の1になり、重力よりも小さくなる。したがって、粒子が回転すると、その直後の平板の上昇運動で粒子は跳躍する。

1.4 粒子の分離率におよぼす水平および鉛直方向の振動加速度の影響

粒子の分離におよぼす水平および鉛直方向の振動加速度の影響を検討するには、2方向の振動加速度を独立に変化させて粒子の分離実験を行う必要がある。粒子の分離率 R は次式で定義される。

$$R = \frac{N_0 - N_r}{N_0} \quad (4)$$

ここで、 N_0 と N_r は、それぞれ初期の粒子数と加振後の残留粒子数である。

Figure 4 は、分離率と水平方向の振幅（あるいは振動加速度）の関係を鉛直方向の振幅（あるいは振動加速度）をパラメータとして示したものである (Kobayakawa *et al.*, 2015a)。1回の測定粒

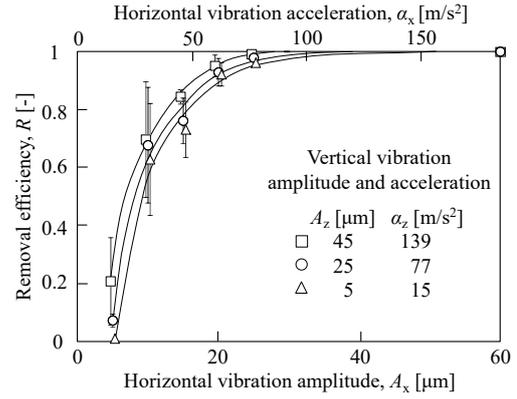


Fig. 4 Relationship between particle removal efficiency and horizontal amplitude as a parameter of vertical amplitude

子数 N_0 は 200 であり、Figure 4 には 3 回の測定結果の平均値および標準偏差 ($\pm 1 \sigma$) をエラーバーで示す。分離率は水平方向の振幅が 5–20 μm の範囲で急激に変化しており、これに比べると鉛直方向の振幅の影響は小さい。

Equation (2) で表される力のモーメントの均衡にしたがって、分離率におよぼす水平および鉛直方向の振動加速度の影響を解析する。レーザー顕微鏡で測定された粒子と平板の表面粗さから推定される平均接触半径 a は 0.3 μm であり、 $D_{p50} = 57 \mu\text{m}$ の場合、 $D_{p50}/2a \approx 100$ となり、回転運動は鉛直方向の加速度よりも水平方向の加速度に大きく依存することがわかる (Eq. (2) 参照)。したがって、Figure 4 で示したように、比較的小さい水平加速度でも粒子の分離率を高められるという実験結果を論理的に説明できる。

2. 跳躍挙動におよぼす粒子径の影響

2.1 跳躍挙動の観察

Figure 5 は、質量基準中位径 D_{p50} の異なる 3 種類のアルミナ粒子、すなわち、(a) $D_{p50} = 500 \mu\text{m}$ の球形粒子、(b) $D_{p50} = 50 \mu\text{m}$ の球形粒子、(c) $D_{p50} = 0.5 \mu\text{m}$ の不定形粒子の跳躍運動を振動の側方から高速度カメラで撮影した画像である (Kobayakawa *et al.*, 2014a)。平板は、水平および鉛直方向にそれぞれ振幅 $A_x = A_z = 35 \mu\text{m}$ 、振動数 $f = 280 \text{ Hz}$ で正弦振動する。また、2方向の振動は同位相な

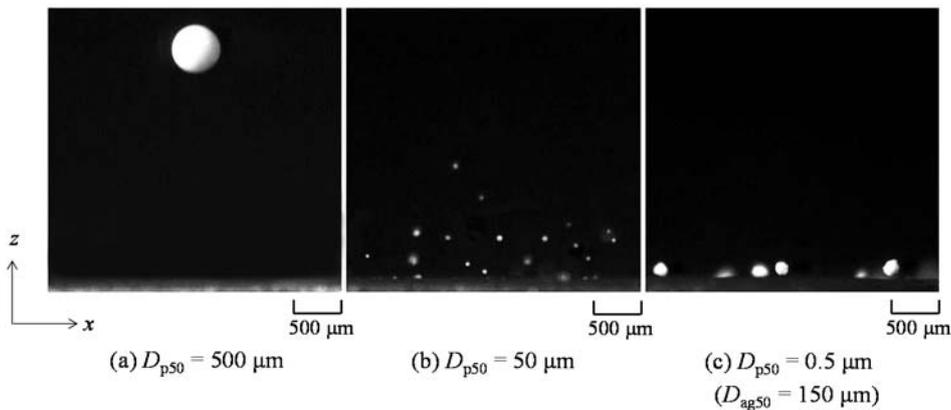


Fig. 5 Snapshots of particle saltation on the obliquely oscillating plate for (a) $D_{p50} = 500 \mu\text{m}$, (b) $D_{p50} = 50 \mu\text{m}$, and (c) $D_{p50} = 0.5 \mu\text{m}$. The images were captured by the high-speed microscope camera at a frame rate of 6000 fps. (a), (b) Primary particles were bouncing, and (c) agglomerated particles with $D_{ag50} = 150 \mu\text{m}$ were bouncing only slightly

ので、平板は右斜め 45° の方向に移動を繰り返す。ここで、水平方向を x 軸、鉛直方向を z 軸とし、 x 軸の正の方向を前方と定義する。Figure5(a) より、 $D_{p50}=500\ \mu\text{m}$ では単一粒子が数 mm の高さまで跳躍することがわかる。Figure5(b) は、 $D_{p50}=50\ \mu\text{m}$ の粒子の跳躍を示すが、粒子は分散状態にあり、跳躍高さは $500\ \mu\text{m}$ の粒子よりも低い。この跳躍高さの違いは、流体抵抗に起因する。 $D_{p50}=0.5\ \mu\text{m}$ の粒子は凝集粒子 ($D_{ag50}=150\ \mu\text{m}$) を形成しており、反発係数が非常に小さいので跳躍高さも小さいが、跳躍は止まることなく繰り返される (Figure5(c))。

Figure 6 は、粒子の跳躍運動を高速度カメラで撮影し、画像処理ソフトで粒子軌跡を追跡したものである (Kobayakawa *et al.*, 2014a)。鉛直方向の変位ゼロは平板の振動の中心に相当する。粒子の軌跡は、粒子半径ゼロの質点として表示してあり、粒子と平板の衝突位置を明示するために円で囲ってある。平板は振動しているの、粒子が平板と衝突するとき、鉛直方向の変位はゼロにはならない。Figure6(a) から、 $D_{p50}=500\ \mu\text{m}$ の粒子は前方への3回の大きな跳躍 (図中の実線) と後方への3回の小さな跳躍 (図

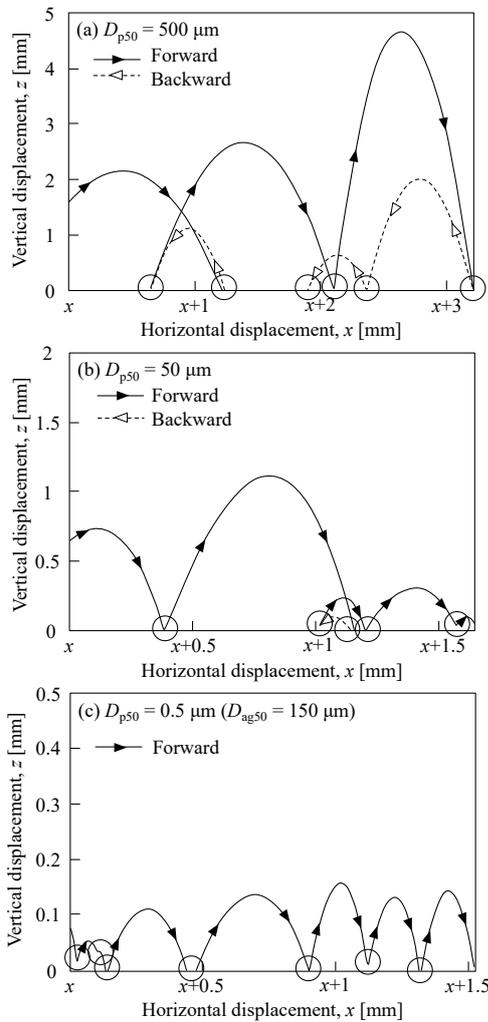


Fig. 6 Trajectories of particles tracked by digital image processing for (a) $D_{p50}=500\ \mu\text{m}$, (b) $D_{p50}=50\ \mu\text{m}$, and (c) $D_{p50}=0.5\ \mu\text{m}$ ($D_{ag50}=150\ \mu\text{m}$). The value of zero in the vertical displacement indicates the center of the oscillation. Solid and dashed lines indicate bounces moving forward and backward, and circles denote the collision of the particles with the oscillating plate

中の破線) をしていることがわかる。粒子は約 $5\ \text{mm}$ の高さまで跳躍し、各跳躍の水平方向の移動距離は $-0.8-1.5\ \text{mm}$ の範囲である。Figure6(b) の $50\ \mu\text{m}$ の粒子は、 $500\ \mu\text{m}$ の粒子に比べて前方への跳躍が多くなり (5回)、後方へは小さな跳躍が1回しか見られない。図中の最大跳躍高さは $1.1\ \text{mm}$ であり、水平移動距離は $-0.1-0.8\ \text{mm}$ の範囲である。また、流体抵抗の影響がみられるので跳躍中の粒子軌跡は左右対称ではない。一方、凝集粒子 ($D_{p50}=0.5\ \mu\text{m}, D_{ag50}=150\ \mu\text{m}$) は後方へは跳躍せず、前方に小さな跳躍を繰り返す (跳躍高さ $0-0.16\ \text{mm}$, 水平移動距離 $0-0.4\ \text{mm}$)。すなわち、一次粒子径の大きいものほど後方への跳躍が多いことがわかる。この理由を次節で説明する。

2.2 振動位相に対する衝突確率

Figure7 に、粒子が振動平板に接近する様子を模式的に示す。正弦波形は、振動位相に対する平板の高さの変化を表しており、破線は一定の時間間隔で投入された粒子の高さの変化を表す。なお、簡単のために、振動平板に接近する平板近傍の粒子の移動速度は一定とする。Figures7(a)と(b)は、鉛直方向の粒子速度が速い場合と遅い場合であり、平板の振動速度に比べて粒子の速度が速い場合、平板の位置 (あるいは位相) にかかわらず、粒子は平板と衝突するが、粒子速度が振動速度よりも遅い場合、粒子が平板と衝突しない領域が存在する。粒子衝突が可能な位相の起点を ϕ_0 、終点を ϕ_1 とおくと、平板が粒子よりも大きな速度で下降する $\phi_1-2\pi-\phi_0$ の範囲では粒子は平板と衝突せず、 $\phi_0-\phi_1$ の領域のみ衝突する。したがって、振動位相に対する粒子の衝突確率は入射速度と振動速度の比に依存する。

従来、振動位相に対する衝突確率の解析は、鉛直方向の一次元振動を対象として行われてきた (Feng and Graff, 1972; Wood and Byrne, 1981; Warr and Huntley, 1995)。Feng and Graff (1972) は、

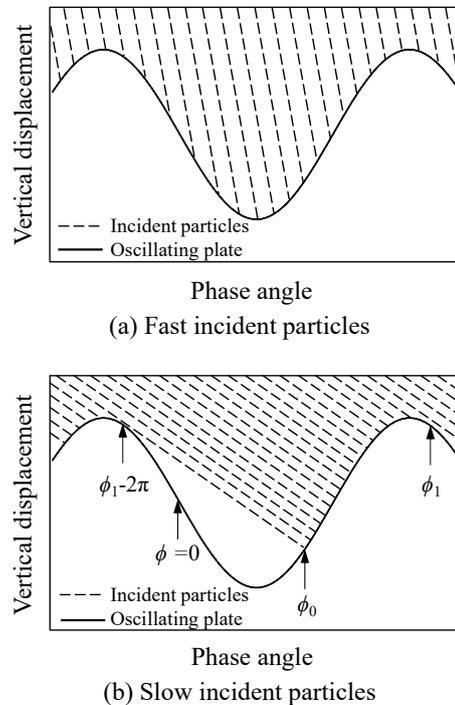


Fig. 7 Illustrations of the vertical displacements of the oscillating plate as a function of phase angle and the movement of incident particles with (a) high velocity and (b) low velocity. The particles are fed downward at constant time intervals and the particles approach the plate at a constant velocity

正弦振動する平板と粒子の衝突確率密度関数 $P(\phi)$ を入射速度の違いによって2つに大別して導出した。入射速度が平板の最大速度よりも速いとき、 $P(\phi)$ は次式で表される。

$$P(\phi) = \frac{1}{2\pi} \left[1 - \left(\frac{A_z \omega}{v_{pz1}} \right) \cos \phi \right] \quad (0 < \phi < 2\pi) \quad (5)$$

ここで、 A_z は振動平板の鉛直方向の振幅、 ω は振動の角速度 ($= 2\pi f$, f は振動数)、 v_{pz1} は粒子の鉛直方向の入射速度である。

一方、入射速度が平板の最大速度よりも遅いとき、 $P(\phi)$ は次式で表される。

$$P(\phi) = \frac{1}{2\pi} \left[1 - \left(\frac{A_z \omega}{v_{pz1}} \right) \cos \phi \right] \quad (\phi_0 < \phi < \phi_1) \quad (6)$$

$$P(\phi) = 0 \quad (0 < \phi < \phi_0, \phi_1 < \phi < 2\pi) \quad (7)$$

ただし、 ϕ_0 と ϕ_1 は次式で表される幾何学的関係によって規定される。

$$\cos \phi_1 = \frac{v_{pz1}}{A_z \omega} \quad (8)$$

$$\sin \phi_0 - \sin \phi_1 = \left\{ \phi_0 - (\phi_1 - 2\pi) \right\} \frac{v_{pz1}}{A_z \omega} \quad (9)$$

Figure 8 (a) は、平板の鉛直方向の変位を振動位相に対して示したものであり、**Figure 8(b)** は本実験の振動条件下で ($A_z = 35 \mu\text{m}$, $\omega = 1760 \text{ s}^{-1}$), Eqs. (5)–(7) から計算した確率密度関数 $P(\phi)$ である。図中のパラメータは粒子の入射速度 v_{pz1} である。入射速度の増加とともに確率密度関数の変化は小さくなり、 $v_{pz1} = \infty$ では一定になる。逆に、接近速度の減少とともに、平板が上向きに動く $\pi/2 - 3\pi/2$ の領域における確率密度関数が大きくなる。特に、 $v_{pz1} = 44.6$

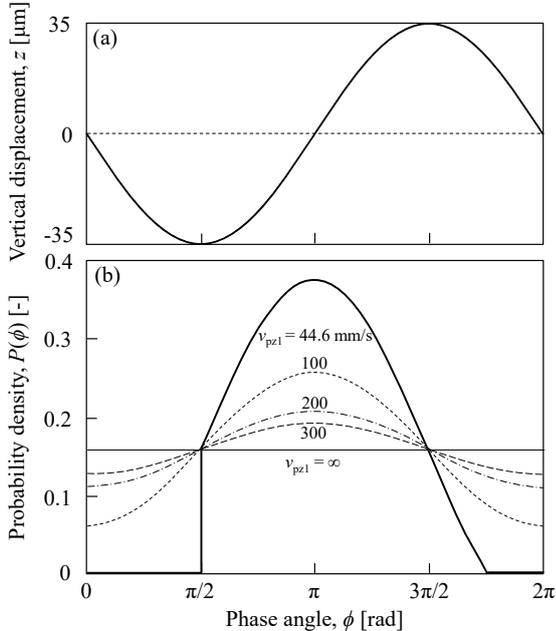


Fig. 8 Analytical results of the collision of the particles with the oscillating plate: (a) the vertical displacement of the plate as a function of phase angle and (b) the relationship between the probability density of the collision and phase angle as a parameter of vertical incident velocity. $v_{pz1} = 44.6 \text{ mm/s}$ is the calculated value, which is obtained using Eqs. (8) and (9) with $\phi_0 = \pi/2$.

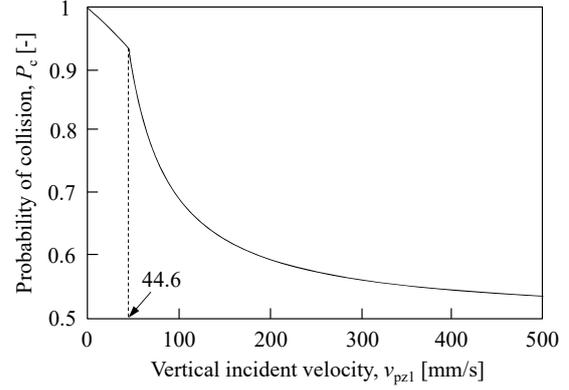


Fig. 9 Probability of collision with the plate moving upward to the total number of collisions as a function of vertical incident velocity

mm/s のとき、位相が $0.50\pi - 1.76\pi$ の領域で衝突するが、 $\phi = 0.50\pi$ で確率密度関数は不連続になる。確率密度関数 $P(\phi)$ を位相で積分すると、積分範囲における衝突確率が得られる。

Figure 9 は、平板が上向きに動く $\pi/2 - 3\pi/2$ の領域における衝突確率と鉛直方向の入射速度の関係を示したものである (Kobayakawa *et al.*, 2014a)。粒子の入射速度の増加とともに、平板の振動の影響が相対的に小さくなり、衝突確率は 0.5 に近づく。入射速度が 100 mm/s 以下になると衝突確率は急激に増加する。**Figure 6** で示した $D_{p50} = 500, 50$, および $0.5 \mu\text{m}$ ($D_{ag50} = 150 \mu\text{m}$) の鉛直方向の入射速度 (絶対値) の範囲は、それぞれ $100 - 300 \text{ mm/s}$, $30 - 120 \text{ mm/s}$, および $20 - 45 \text{ mm/s}$ であり、入射速度が 45 mm/s 以下の凝集粒子 ($D_{ag50} = 150 \mu\text{m}$) は、上向きに動く平板との衝突確率が極めて高くなる。本実験では、水平方向と鉛直方向の振動は同期しているため、鉛直方向の入射速度の小さい微粒子ほど上向きに動く平板と高い頻度で衝突すると同時に、前方へ跳躍する割合が多くなる。反対に、鉛直方向の入射速度の大きい粗粒子ほど、平板の振動位相に対してより等確率で衝突が起こるので、後方への跳躍の割合が多くなる。

2.3 平均移動速度におよぼす粒子径の影響

粒子の輸送速度におよぼす粒子径の影響を評価するため、1回の跳躍にともなう水平移動距離を時間で割って移動速度 v_{pxa} を求める。**Figure 10** は、200回の跳躍から得られた移動速度 v_{pxa} の積算分布である (Kobayakawa *et al.*, 2014a)。 v_{pxa} の正と負の符号は、それぞれ前方と後方への跳躍を表す。 $D_{p50} = 500, 50$, および 0.5

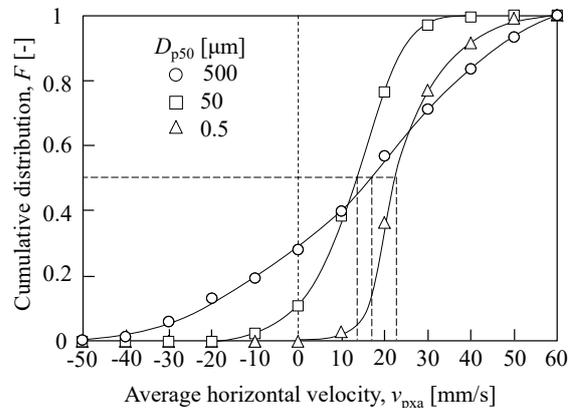


Fig. 10 Cumulative distributions of average horizontal velocities during each bounce. Each distribution curve consists of 200 bounces

Table 1 Parameters of particles used in the simulation

Particle	A	B	C
Particle diameter D_p [μm]	500	50	150
Particle density ρ_p [kg/m^3]	3900	3900	930
Coefficient of restitution e [-]	0.9	0.9	0.1
Coefficient of friction μ [-]	0.1	0.1	0.2

μm ($D_{ag50} = 150 \mu\text{m}$) の移動速度の範囲は、それぞれ -50 – -60 、 -20 – -40 、および 0 – 60 mm/s であり、中位値は 18, 14, および 23 mm/s である。500 μm の粒子は、振動位相に関わらず平板と衝突し、しかも流体抵抗が比較的小さいので、移動速度の分布は広くなる。また、 $D_{p50} = 0.5 \mu\text{m}$ ($D_{ag50} = 150 \mu\text{m}$) の凝集粒子は後方には跳躍せず、前方のみに移動するので、平均移動速度は大きくなる。

2.4 跳躍挙動の数値計算

Figure 6 に示した粒子径による跳躍挙動の違いを動力学解析によって説明するために、粒子にはたらく重力、流体抵抗、粒子–平板の反発および摩擦を考慮した運動方程式を解き、Lagrange 的に粒子を追跡する。粒子径と反発係数が異なる粒子の跳躍運動を数値計算し、得られた粒子の跳躍高さの分布と跳躍距離の分布を実験結果と比較する。粒子の力学特性は前述の実験条件に合わせる (Table 1 参照)。ただし、 $D_{p50} = 0.5 \mu\text{m}$ の粒子で構成された凝集粒子 ($D_{ag50} = 150 \mu\text{m}$) は $D_p = 150 \mu\text{m}$ の低反発性単一球形粒子とし、表中の反発係数 e と摩擦係数 μ は平板に粒子を衝突させ、入射速度と跳ね返り速度の関係から実験的に求めた。本計算条件では、跳躍時の運動は回転よりも並進運動が支配的であり、並進の運動方程式で評価が可能である。

Figure 11 に、200 回の試行計算によって得られた粒子の跳躍高さの積算分布を曲線で示す (Kobayakawa *et al.*, 2014b)。図中のプロットは実験結果である。Table 1 で示した粒子 A, B, および C の最大跳躍高さは、それぞれ 8, 2, および 0.3 mm である。粒子 B は粒子 A より小さく、慣性よりも流体抵抗の影響を強く受けるので跳躍高さは低い。粒子 C は、平板との衝突の反発係数が著しく小さいので、さらに跳躍高さは低くなる。

次に、跳躍距離の積算分布を Figure 12 に示す (Kobayakawa *et al.*, 2014b)。跳躍距離の符号は、粒子の移動方向に対応しており、

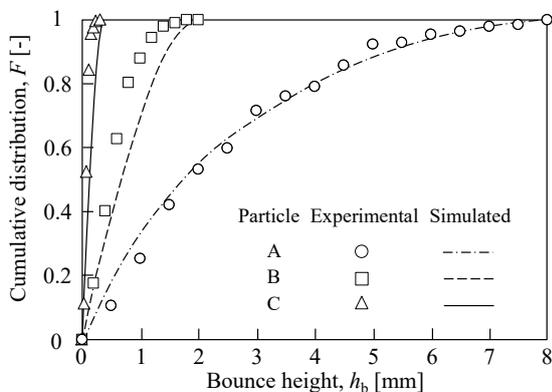


Fig. 11 Cumulative distributions of bounce heights. Each distribution curve consists of 200 simulated datasets. Plot points indicate experimental data for $D_{p50} = 500 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ and $0.5 \mu\text{m}$ ($D_{ag50} = 150 \mu\text{m}$), and lines indicate simulation results for particle A, B, and C

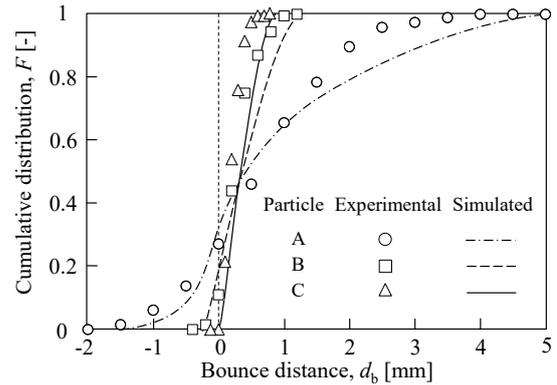


Fig. 12 Cumulative distributions of bounce distances. Each distribution curve consists of 200 simulated datasets. Plot points indicate experimental data for $D_{p50} = 500 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ and $0.5 \mu\text{m}$ ($D_{ag50} = 150 \mu\text{m}$), and lines indicate simulation results for particle A, B, and C

正は前方、負は後方の移動を表す。粒子 A, B, および C の跳躍距離の範囲は、それぞれ -2 – 5 、 -0.3 – 1.2 、および 0 – 0.6 mm であり、全跳躍に対する後方への跳躍の割合は 0.33, 0.21, および 0 である。跳躍高さの小さい粒子は跳躍時間が短いので、跳躍距離 (絶対値) も減少する傾向にある。計算結果は実験結果と良好に一致しており、跳躍運動の違いは、主に平板との衝突の反発係数および空気中で受ける流体抵抗に起因することがわかる。

なお、一次粒子径が小さくなると、跳躍高さや跳躍距離の計算結果の絶対値が実験結果よりも僅かに大きくなる傾向が見られる。これは、粒子径の減少にともなって、粒子–壁間の衝突時の付着力 (Dahneke, 1971) や表面間に挟まれた微小間隙で流体の圧力が増加する潤滑効果 (Kobayakawa *et al.*, 2015b) などの数値計算に含まれていない影響が大きくなったことが原因として考えられる。

結 言

微粒子の振動輸送に関係する精密ハンドリングの基盤技術を確立するには、二次元振動する平板上の粒子挙動の解明が必要であり、本報では、既存の振動平板上の粒子挙動の基礎的知見を踏まえて実施された最近の実験および理論的研究の成果をまとめ、微粒子の振動輸送に関する統一的な考え方を示した。要点を以下に記す。

二次元振動平板上に付着した微粒子に対して、十分な強度の振動を加えると、粒子は動き始めるが、水平方向の振動は粒子に回転運動を与えることになる。このとき、粒子–平板間の付着力は大きく減少するので、直後の平板の上昇にともなって粒子は跳躍を開始する。この現象は、微視的観察によって確認できるが、粒子–平板の分離率の測定結果および力のモーメントの均衡による解析によって説明できる。したがって、微粒子の振動輸送では水平方向の振動加速度を効果的に利用すべきである。

二次元振動平板上の微粒子の跳躍では、粒子径を小さくすると重力よりも付着力や流体抵抗が支配的になり、粒子の挙動が変化する。すなわち、粗粒子は一次粒子として進行方向が不定の大きな跳躍を繰り返すのに対し、微粒子は反発係数の小さい凝集粒子を形成し、一定方向に微小な跳躍を続ける。結果として、凝集粒

子の平均移動速度は粗粒子と比較して大きくなる。粒子の衝突と反発および粒子の跳躍の軌跡は、二次元振動平板上への粒子の衝突速度に大きく依存し、理論的確率モデルおよび動力学を基礎とする粒子軌跡の数値シミュレーションによって説明できる。

以上の知見は、粒子の材質を変えても適用可能と考えられるが、分離時に回転運動よりも並進運動が支配的になる不規則形状の粒子や衝突時に付着力や潤滑効果が支配的になる超微粒子を対象とした粒子挙動の解析は今後の課題である。

Literature Cited

- Clement, E., S. Luding, A. Blumen, J. Rajchenbach and J. Duran; "Fluidization, Condensation and Clusterization of a Vibrating Column of Beads," *J. Mod. Phys. B*, **7**, 1807–1827 (1993)
- Dahneke, B.; "The Capture of Aerosol Particles by Surfaces," *J. Colloid Interface Sci.*, **37**, 342–353 (1971)
- Feng, C.C. and K. F. Graff; "Impact of a Spherical Tool against a Sonic Transmission Line," *J. Acoust. Soc. Am.*, **52**, 254–259 (1972)
- Gallas, J.A.C., H.J. Herrmann and S. Sokolowski; "Two-Dimensional Powder Transport on a Vibrating Belt," *J. Phys. II France*, **2**, 1389–1400 (1992)
- Geminard, J.-C. and C. Laroche; "Energy of a Single Bead Bouncing on a Vibrating Plate: Experiments and Numerical Simulations," *Phys. Rev. E*, **68**, 031305 (2003)
- Hubbard, J.A., J.E. Brockmann, D. Rivera and D.G. Moore; "Experimental Study of Impulse Resuspension with Laser Doppler Vibrometry," *Aerosol Sci. Technol.*, **46**, 1303–1312 (2012)
- Ishii, K., M. Suzuki, T. Segawa, Y. Kihara, M. Yasuda and S. Matsusaka; "A Vibrating Tube Method for Evaluating Flowability of a Small Amount of Sample Particles," *Adv. Powder Technol.*, **22**, 522–525 (2011)
- Jiang, Y., S. Matsusaka, H. Masuda and T. Yokoyama; "Evaluation of Flowability of Composite Particles and Powder Mixtures by a Vibrating Capillary Method," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **39**, 14–21 (2006)
- Jiang, Y., S. Matsusaka, H. Masuda and Y. Qian; "Characterizing the Effect of Substrate Surface Roughness on Particle–Wall Interaction with the Airflow Method," *Powder Technol.*, **186**, 199–205 (2008)
- Jiang, Y., S. Matsusaka, H. Masuda, and Y. Qian; "Development of Measurement System for Powder Flowability Based on Vibrating Capillary Method," *Powder Technol.*, **188**, 242–247 (2009)
- Kobayakawa, M., M. Yasuda and S. Matsusaka; "Microscopic Analysis of Saltation of Particles on an Obliquely Oscillating Plate," *Adv. Powder Technol.*, **25**, 1845–1853 (2014a)
- Kobayakawa, M., A. Fujimoto, M. Sakata, M. Yasuda and S. Matsusaka; "Numerical and Theoretical Study of Particle Saltation on an Obliquely Oscillating Plate," *Adv. Powder Technol.*, **25**, 1854–1859 (2014b)
- Kobayakawa, M., S. Kiriya, M. Yasuda and S. Matsusaka; "Microscopic Analysis of Particle Detachment from an Obliquely Oscillating Plate," *Chem. Eng. Sci.*, **123**, 388–394 (2015a)
- Kobayakawa, M., A. Fujimoto, M. Yasuda and S. Matsusaka; "Microscopic Analysis of Particle–Wall Collision," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **41**, 281–287 (2015b)
- Kousaka, Y., K. Okuyama and Y. Endo; "Re-Entrainment of Small Aggregate Particles from a Plane Surface by Air Stream," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **13**, 143–147 (1980)
- Liu, Y.H., H. Maruyama and S. Matsusaka; "Effect of Particle Impact on Surface Cleaning Using Dry Ice Jet," *Aerosol Sci. Technol.*, **45**, 1519–1527 (2011)
- Liu, Y.H., D. Hirama and S. Matsusaka; "Particle Removal Process during Application of Impinging Dry Ice Jet," *Powder Technol.*, **217**, 607–613 (2012)
- Luding, S., E. Clement, A. Blumen, J. Rajchenbach and J. Duran; "Studies of Columns of Beads under External Vibrations," *Phys. Rev. E*, **49**, 1634–1646 (1994)
- Maniero, R., E. Climent and P. Bacchin; "Adhesion and Detachment Fluxes of Micro-Particles from a Permeable Wall under Turbulent Flow Conditions," *Chem. Eng. Sci.*, **71**, 409–421 (2012)
- Matsusaka, S. and H. Masuda; "Particle Reentrainment from a Fine Powder Layer in a Turbulent Air Inflow," *Aerosol Sci. Technol.*, **24**, 69–84 (1996)
- Matsusaka, S., M. Urakawa and H. Masuda; "Micro-Feeding of Fine Powders Using a Capillary Tube with Ultrasonic Vibration," *Adv. Powder Technol.*, **6**, 283–293 (1995)
- Matsusaka, S., K. Yamamoto and H. Masuda; "Micro-Feeding of a Fine Powder Using a Vibrating Capillary Tube," *Adv. Powder Technol.*, **7**, 141–151 (1996)
- Matsusaka, S., M. Koumura and H. Masuda; "Analysis of Adhesive Force between Particle and Wall Based on Particle Reentrainment by Airflow and Centrifugal Separation," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **23**, 561–568 (1997)
- Matsusaka, S., M. Kobayakawa, T. Yamamoto and M. Yasuda; "Analysis of Vibration Shear Flow of Fine Powders," *J. Soc. Powder Technol. Japan*, **49**, 663–668 (2012a)
- Matsusaka, S., M. Kobayakawa, Y. Hosoh and M. Yasuda; "Micro-Feeding of Fine Powders Using Vibration Shear Flow," *J. Soc. Powder Technol. Japan*, **49**, 658–662 (2012b)
- Matsusaka, S., M. Kobayakawa, M. Mizutani, M. Imran and M. Yasuda; "Bubbling Behavior of a Fluidized Bed of Fine Particles Caused by Vibration-Induced Air Inflow," *Scientific Reports*, **3**, 1190 (2013)
- Mawatari, Y., T. Koide, Y. Tatemoto, S. Uchida and K. Noda; "Effect of Particle Diameter on Fluidization under Vibration," *Powder Technol.*, **123**, 69–74 (2002)
- Mizutani, M., M. Yasuda and S. Matsusaka; "Dynamic Analysis of Bubbling Fluidized Bed of Fine Particles Caused by Vibration Convection and Vibration-Induced Air Inflow," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **39**, 420–425 (2013)
- Mori, S., T. Haruta, A. Yamamoto, I. Yamada and E. Mizutani; "Vibro-Fluidization of Very Fine Particles," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **15**, 992–997 (1989)
- Mracek, M. and J. Wallaschek; "A System for Powder Transport Based on Piezoelectrically Excited Ultrasonic Progressive Waves," *Mater. Chem. Phys.*, **90**, 378–380 (2005)
- Mullins, M.E., L.P. Michaels, V. Menon, B. Locke and M.B. Ranade; "Effect of Geometry on Particle Adhesion," *Aerosol Sci. Technol.*, **17**, 105–118 (1992)
- Rademacher, F.J.C. and L. ter. Borg; "On the Theoretical and Experimental Conveying Speed of Granular Bulk Solids on Vibratory Conveyors," *Forsch. Ingenieurwes.*, **60**, 261–283 (1994)
- Salazar-Banda, G.R., M.A. Felicetti, J.A.S. Goncalves, J.R. Coury and M.L. Aguiar; "Determination of the Adhesion Force between Particles and a Flat Surface, Using the Centrifuge Technique," *Powder Technol.*, **173**, 107–117 (2007)
- 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)
- Simsek, E., S. Wirtz, V. Scherer, H. Kruggel-Emden, R. Grochowski and P. Walzel; “An Experimental and Numerical Study of Transversal Dispersion of Granular Material on a Vibrating Conveyor,” *Part. Sci. Technol.*, **26**, 177–196 (2008)
- Slot, E.M. and N.P. Kruyt; “Theoretical and Experimental Study of the Transport of Granular Materials by Inclined Vibratory Conveyors,” *Powder Technol.*, **87**, 203–210 (1996)
- Soltani, M. and G. Ahmadi; “Particle Removal Mechanisms under Substrate Acceleration,” *J. Adhes.*, **44**, 161–175 (1994)
- Soltani, M., G. Ahmadi, R.G. Bayer and M.A. Gaynes; “Particle Detachment Mechanisms from Rough Surfaces under Substrate Acceleration,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, **9**, 453–473 (1995)
- Takano, T. and Y. Tomikawa; “Excitation of a Progressive Wave in a Lossy Ultrasonic Transmission Line and an Application to a Powder-Feeding Device,” *Smart Mater. Struct.*, **7**, 417–421 (1998)
- Tatemoto, Y., Y. Mawatari, M. Yamamoto and K. Noda; “Effect of Vibration on Particle Motion in Two Dimensional Fluidized Bed,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **27**, 824–826 (2001)
- Theerachaisupakij, W., S. Matsusaka, M. Kataoka and H. Masuda; “Effects of Wall Vibration on Particle Deposition and Reentrainment in Aerosol Flow,” *Adv. Powder Technol.*, **13**, 287–300 (2002)
- Theerachaisupakij, W., S. Matsusaka, H. Akashi and H. Masuda; “Reentrainment of Deposited Particles by Drag and Aerosol Collision,” *J. Aerosol Sci.*, **34**, 261–274 (2003)
- 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)
- Wang, H.-C.; “Effects of Inceptive Motion on Particle Detachment from Surfaces,” *Aerosol Sci. Technol.*, **13**, 386–393 (1990)
- Warr, S. and J. M. Huntley; “Energy Input and Scaling Laws for a Single Particle Vibrating in One Dimension,” *Phys. Rev. E*, **52**, 5596–5601 (1995)
- Wood, L.A. and K.P. Byrne; “Analysis of a Random Repeated Impact Process,” *J. Sound Vib.*, **78**, 329–345 (1981)
- Yang, S. and J.R.G. Evans; “Computer Control of Powder Flow for Solid Freeforming by Acoustic Modulation,” *Powder Technol.*, **133**, 251–254 (2003)
- Yang, S. and J.R.G. Evans; “Acoustic Control of Powder Dispensing in Open Tubes,” *Powder Technol.*, **139**, 55–60 (2004)
- Zainuddin, I.M., M. Yasuda, T. Horio and S. Matsusaka; “Experimental Study on Powder Flowability Using Vibration Shear Tube Method,” *Part. Part. Syst. Char.*, **29**, 8–15 (2012)
- Zhou, L., H. Wang, T. Zhou, K. Li, H. Kage and Y. Mawatari; “Model of Estimating Nano-Particle Agglomerate Sizes in a Vibro-Fluidized Bed,” *Adv. Powder Technol.*, **24**, 311–316 (2013)

Analysis of Vibratory Conveying of Fine Particles

Murino KOBAYAKAWA and Shuji MATSUSAKA

Department of Chemical Engineering, Kyoto University, Kyotodaigakukatsura, Nishikyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto 615-8510, Japan

Keywords: Vibratory Conveying, Fine Particle, Saltation, Fluid Resistance, Adhesive Force

The vibrating conveyor is a machine with an obliquely oscillating trough that induces the saltation of particles. It is widely used for the transport of solid materials in industry. However, basic studies on the adhesive forces and fluid resistance that act on the particles have been neglected, and there have been few reports detailing the vibratory conveying of fine particles. This review summarizes the latest experimental and theoretical results on the behavior of fine particles on a two-dimensional oscillating plate. When a sufficiently high intensity of two-dimensional vibrations is applied to particles adhering to a plate, the particles become detached and bounce repeatedly. The external force in the tangential direction of the plate induces particle rolling, which decreases the particle–plate interaction force; as a result, even a relatively small external force will allow the particle to become detached from the plate. Furthermore, coarse single particles are transported by the repeated larger bounces with both forward and backward motions. On the other hand, fine particles can easily form agglomerated particles with low restitution and bounce slightly but only forward. Consequently, the transport velocity of agglomerated particles is greater than that of coarse single particles. These phenomena can be explained with a theoretical probability model and numerical simulation of the particle trajectory.