

[原著論文]

固液系 2 次元流動層における粒子の速度分布

東京農工大学 工学部

小 俣 雄 史

*東京農工大学 工学部

平 山 修

適当な時間間隔をおいた 4 つのビデオ画像を利用する方法により固液系 2 次元流動層における粒子の速度分布を実験的に求めることに成功した。すなわち、まず適切な時間間隔を設定し隣り合う時刻の画像どうしの比較を行うことで、すべての粒子を同定しつつ、動きを追跡することを可能にした。さらに、それらの粒子について 1 番目および 4 番目の画像での位置を比較して速度を求めた。この方法に基づいて、3 通りの流量、2 通りの粒子数に対して水平方向および鉛直方向の粒子速度の度数分布を求めることができた。粒子数が少ない場合、水平方向は左右対称な指数分布関数、鉛直方向は異方性のある非対称な指数分布関数で近似できることがわかった。指数の大きさは流量が大きいほど小さく、鉛直方向の速度分布の指数は上向きの場合のほうが下向きの場合よりも小さいことがわかった。粒子数を 2 倍にすると、指数分布以外にガウス分布、t 分布も得られることがわかった。

Velocity Distributions of Solid Particles in Two-dimensional Liquid-Solid Fluidized Bed

Takefumi OMATA, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology

Osamu HIRAYAMA, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology

(Received 29 November, 2004; in revised form 12 February, 2005)

Velocity distributions of solid particles in liquid-solid fluidized beds were obtained experimentally by the use of the four video pictures with appropriate time interval. First, each pairs of pictures with an appropriate successive time interval were compared in order to identify the trajectories of all particles then the locations of all the particles in the fourth picture were compared with those in the first picture in order to determine the velocities of all the particles. Based on this method the velocity distributions of particles were investigated for three types of flow rate and two types of particle numbers. It was clarified that in the case of small number of particles the velocity distributions for the horizontal direction was approximated as symmetric exponential distribution functions and those for vertical direction was asymmetric exponential distribution functions. It was found that the larger the flow rate is, the smaller the exponent becomes and in the case of vertical directions the exponents for the upward velocities are smaller than those for downwards ones. Furthermore, it was clarified that in the case of large number of particles Gaussian distribution function and t-distribution function are also obtained.

(KEY WORDS): Fluidized bed, Velocity distribution, Experiment, Exponential distribution function, Video pictures

1 はじめに

流動層を含む散逸系における固体粒子の速度分布についての研究は、シミュレーションによる研

究¹⁻⁵⁾と実験による研究⁶⁻¹¹⁾の両者がある。流動層または振動層での粒子の速度分布を求めた実験的な研究について見ると、オイラー的な速度分布（速度の空間分布）を求めた研究⁶⁻⁸⁾、少数のトレーサー粒子の運動を長時間録画した画像の解析結果から速度相関や速度の大きさの度数分布を求めた研究⁹⁾、多数の粒子の運動を録画した画像の

*〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

†E-mail: hrym@cc.tuat.ac.jp

固液系 次元流動層における粒子の速度分布

解析から直接に粒子の速度の度数分布を求めた研究^{10, 11)}に分類できる。最後のものは、近年用いられるようになった、1秒間に1000コマ以上の撮影が可能な高速度カメラと大容量の情報を処理できる画像解析システムによるものである。

これらの研究から明らかにされた個々の粒子速度の度数分布（以下、単に速度分布と呼ぶ）についての結果を見ると、シミュレーションによる研究では、粒子の速度分布は境界条件や容器の形状に依存し、ガウス分布のみでなく、非ガウス分布も得られることが明らかにされている。^{4, 5)}一方、実験による研究では、速度分布はガウス分布（マックスウェル分布）に近いという結論が得られている。^{9, 11)}ただし、これらの結果は、粒子速度の大きさの平均値が数 cm/s から数 10 cm/s という場合についてのものであり、シミュレーションの結果から推測すると、粒子速度が非常に小さく最小流動化速度と同程度である場合には、実験においても非ガウス分布が得られることが期待できる。そこで、本研究では、粒子速度が数 mm/s と非常に小さい場合の固液系 2 次元流動層について粒子の速度分布（速度の度数分布）および速度分布関数を実験により求めるにした。本論文の第 1 の目的はその結果について報告することである。

また、このような低速度の粒子系を対象とする場合には、高性能の高速度カメラや自動画像解析システムなど高額な実験装置が無くとも、本研究のように比較的安価な実験装置と画像解析システムを用いてデータの採取および解析を行うことが可能である。その方法について報告することが本論文の第 2 の目的である。

2 実験方法およびデータの解析方法

2.1 実験装置

本研究で使用した実験装置について図 1 に示す。本体容器は、粒子径よりもやや広い間隔で設置された 2 枚の平板間に球形の固体粒子を封入し、ポンプを用いて容器の下部より水を流入させ上部より排出させる構造になっている。図のテストセクション内に封入された固体粒子はその水流により浮遊して流動層を形成する。平板間の間隔は 10.5 mm であるが、テストセクション部は厚さ 4 mm の透明なアクリル板を敷くことにより流路厚さが

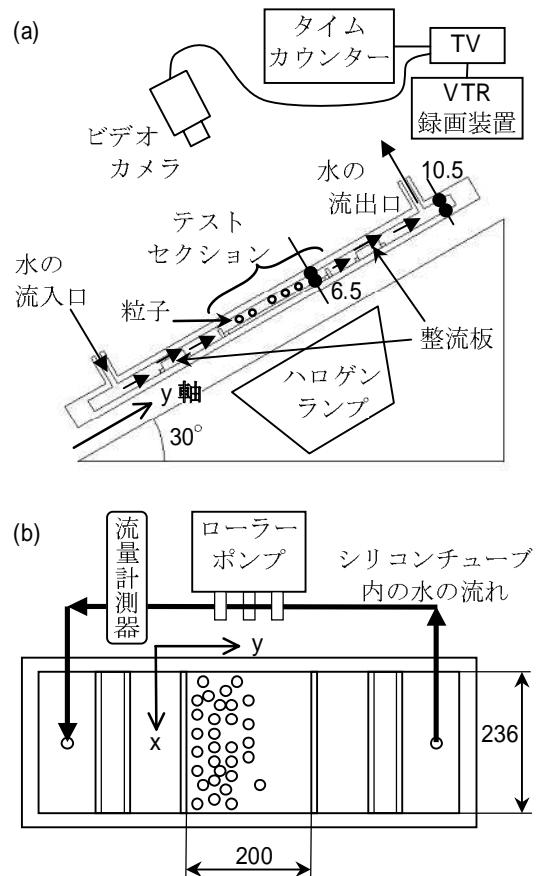


図 1 実験装置概略図. (a) 側面図, (b) 上面図

6.5 mm となっている。また、テストセクションの前後に流路厚さ 1.0 mm となるような整流板を設けて水を整流化した。テストセクションを含む本体容器は水平角約 30° の傾きを設けて設置された。本研究ではこの平板間の全粒子の速度を測定し、平板内における水の平均的な流れの方向（すなわち水平面に対して約 30° 傾いた方向）を y 方向、その垂直方向（すなわち水平方向）を x 方向として、粒子速度の x 成分および y 成分の度数分布、さらにそれらの速度分布関数を求める。

水は定量ローラーポンプ（古江サイエンス、RP-LV）によって循環させた。水の流量は約 2.0 ℥ /min を上限にローラーの回転数で調整でき、流量は流量計測器（RYUKI, 4D 特殊 61984）で測定した。テストセクションの撮影はビデオカメラ（VICTOR, GP-33）によりその鉛直上方から行う。ビデオカメラの映像はリアルタイムで TV (SONY, KV-21SVF1) 画面に映し出されると同時にタイムカウント付きで VTR 録画される。映像のコントラ

ストを鮮明に付ける目的でテストセクション直下からハロゲンランプ（高儀，作業用ハロゲン投光器システム WL-551）を照射した。また，笠代わりとして薄い白色プラスチック板をハロゲンランプとテストセクション間に設置した。

2.2 実験方法

実験の方法と手順を以下に述べる。実験装置の組み立て後に，テストセクションに粒径 6 mm，密度 1.06 g/cm³ のプラスチック球（TOKYO MARUI, 0.12 g ミニ電動ガン対応 BB 弾）を所定の個数配置する。次に，水を循環させ，固体粒子が正常に流動化することを確認した上で，撮影装置をセッティングして撮影・録画を行う。その際，流量が指定した値に保たれていることを確認しながら 1 分程度行う。この手順に基づきデータの収集は，水の流量については 1.0 ℓ/min, 1.5 ℓ/min, 2.0 ℓ/min の 3 通り，粒子の個数については 154 個，308 個の 2 通りについて行った。

2.3 粒子速度の解析

まず，撮影された 1 分程度の VTR 録画のうち，画像処理ソフトウェア（DTECT, DIPP98）を用いて任意時刻 t のスナップ画像と $t + \Delta t$ のスナップ画像を PC へ取り込む。解析時間間隔 Δt に関してはコマ数で指定する。取り込んだ画像は，別ソフト（Adobe, Photoshop 6.0）を用いて「コントラスト」を適度に調整し，2 値化を行う。2 値化した画像に対して再び DIPP98 を用い，「収縮」ツールを適用することで，全粒子の重心付近の画素をあらわにする。最後に「自動計測」ツールを用いて重心座標値を計測する。計測はすべてソフトによる自動計測であるが，座標スケールに関しては mm 単位と異なるソフト独自のスケールであるので，後に mm 単位に変換する。

2.4 時間間隔の決定と粒子速度の算出

任意時刻 t の画像と $t + \Delta t$ の画像を比較して，それぞれの画像の全粒子を確実に同定する必要があるため， Δt を十分に短くとる必要がある。ここで，水の流速を V_f ，粒径を d とすると $V_f \cdot \Delta t \ll d$ でなければならない。これより $V_f = 10 \text{ mm/s}$ とすると $\Delta t \ll 0.6 \text{ s}$ が得られる。

この数字を踏まえていくつかのデータ処理をテ

スト的に行い， $\Delta t = 0.165 \sim 0.330 \text{ s}$ の範囲が適当であることを確認した。しかしながら， Δt ごとのデータから直接に速度分布を求めようとする場合，次の問題点がある。第 1 に，この時間間隔では粒子の移動距離が非常に小さいため，速度分布を求めるとき相対誤差がかなり大きくなると考えられる。第 2 に，速度分布のヒストグラムを描いてみると速度のバリエーションが乏しくなる傾向がある。そこで以下の手法を導入した。粒子の速度分布を求めるために任意時刻 t と $t + \Delta t$ の 2 画像の他， $t + 2 \Delta t$ の画像と $t + 3 \Delta t$ の画像も利用する（すなわち 4 時刻の画像を利用する）。これら 4 時刻の画像を重ね合わせると各粒子の軌跡が得られるが，実際にその操作を行うと軌跡が不自然に交差しているような粒子は見られない。このようにして，粒子の同定を 100% 確実に行い，時刻 t の画像と時刻 $t + 3 \Delta t$ の画像から各粒子の速度を求めた。

3 実験結果

前節で述べた方法を用いて得られた水平方向および鉛直方向の速度分布を以下に示す。

3.1 粒子数 154 の場合

まず，粒子の個数を 154 個として，水の流量が (i) 2.0 ℓ/min (ii) 1.5 ℓ/min (iii) 1.0 ℓ/min のそれぞれの場合について実験を実施し，データの解析については各流量とも初期時刻を変えて 3 例ずつを行った。

図 2 に流量が 2.0 ℓ/min の場合の実験結果の 1 例を示す。図 2(a) は 4 つの時刻 t , $t + \Delta t$, $t + 2 \Delta t$, $t + 3 \Delta t$ ($\Delta t = 0.198 \text{ s}$) における粒子の重心位置である。なお，重心位置は時刻ごとに色分けして示した。一見して 154 個すべての粒子について同定が可能であることがわかる。図 2(b) に水平方向および鉛直方向の速度成分 v_x , v_y を，2 mm/s ごとに区分した場合の相対頻度のヒストグラムを示す（相対頻度 = 該当粒子数 / 全粒子数）。図 2(c) に単独粒子の沈降速度 U_0 (= 588 mm/s) で無次元化した水平，鉛直成分それぞれの速度分布を示す。ここで v_x , v_y は各速度区分の中間値をとった。また，縦軸は相対頻度 $f(v_x)$, $f(v_y)$ をそれぞれ対数目盛で示している。まず，水平方向につ

固液系 次元流動層における粒子の速度分布

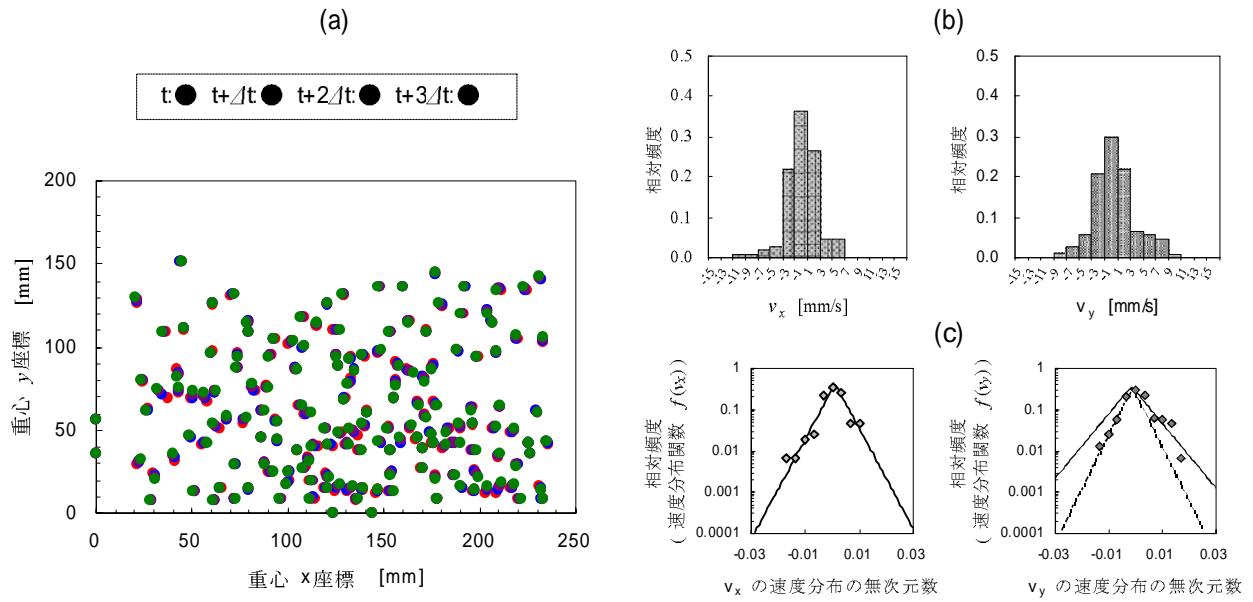


図2 粒子数154、流量2.0ℓ/minの場合の実験結果. (a) 4時刻における粒子の重心位置 (b) v_x , v_y の相対頻度のヒストグラム (c) 指数分布関数による相対頻度のフィッティング

いて見てみると $f(v_x)$ は

$$f(v_x) = A \exp\left(-\alpha \left| \frac{v_x}{U_0} + c \right| \right) \quad (1)$$

($\alpha = 280$, $c = 0.001$, $A = 0.432$) の直線で近似することができ、左右についてはほぼ対称な指数型の分布関数で近似されることがわかる。次に、鉛直方向について見てみると $v_y < 0$, $v_y > 0$ の領域のいずれも $f(v_y)$ は

$$f(v_y) = B \exp\left(-\beta \left| \frac{v_y}{U_0} + d \right| \right) \quad (2)$$

の分布関数でそれぞれ近似できるが、 $v_y > 0$ の場合と $v_y < 0$ の場合とで定数の値が異なる上下非対称の指数型の分布関数が得られた。これは2次元流動層中の粒子の速度分布が鉛直方向に異方性を持っていることを示している。また $v_y > 0$ の領域のほうが β の値が小さいのは、速度（の絶対値）の大きな粒子が $v_y < 0$ の領域よりも多く存在していることを示している。同一の流量2.0 ℓ/minの場合について、初期時刻を変えた他の2例についても同様の速度分布関数が得られた。その場合の定数 a , c , A , β , d , B の値を表1に示す。表1の①, ②, ③のどの場合もその分布がほぼ一致していることから、測定された状態は平衡状態に

近いものと推定した（他の流量についても同様）。

流量が 1.5 ℓ/min, 1.0 ℓ/min の場合の実験データの1例を図3および図4に示す。これらの場合も流量 2.0 ℓ/min の場合と同様に、水平方向については左右対称な指数型の分布関数、鉛直方向については上下非対称な指数型の分布関数が得られた。初期時刻を変えた他の例についても同様の分布関数が得られた。表1にこれらの場合の定数 a , c , A , β , d , B の値も示した。 α , β ($v_y > 0$), β ($v_y < 0$) のいずれも、流量が大きいほどその値が小さいことがわかる。これは、流量が大きいほど速度の大きな粒子が多いことを示している。

3.2 粒子数308の場合

次に、粒子数を2倍の308個とした場合についても各1例ずつのデータ解析を行った。

図5は、流量が 2.0 ℓ/min の場合の解析結果で、粒子数154の場合と比べてばらつきが目立つものの、やはり水平方向については左右対称な指数型の分布関数、鉛直方向については上下非対称な同分布関数で近似されることがわかる。ただし、鉛直方向については速度が小さい部分を一点鎖線のようなガウス分布で近似することも可能である。なお、水平方向の分布関数 $f(v_y)$ (ガウス型) は

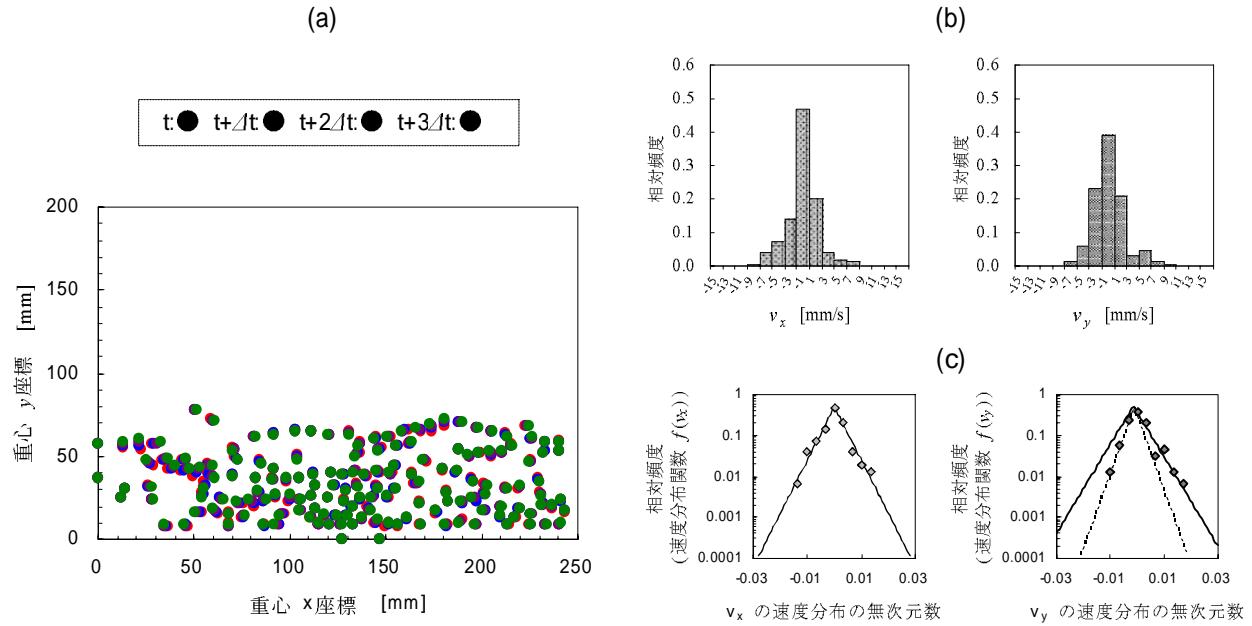


図3 粒子数154, 流量 $1.5\text{ l}/\text{min}$ の場合の実験結果. (a) 4時刻における粒子の重心位置 (b) v_x , v_y の相対頻度のヒストグラム (c) 指数分布関数による相対頻度のフィッティング

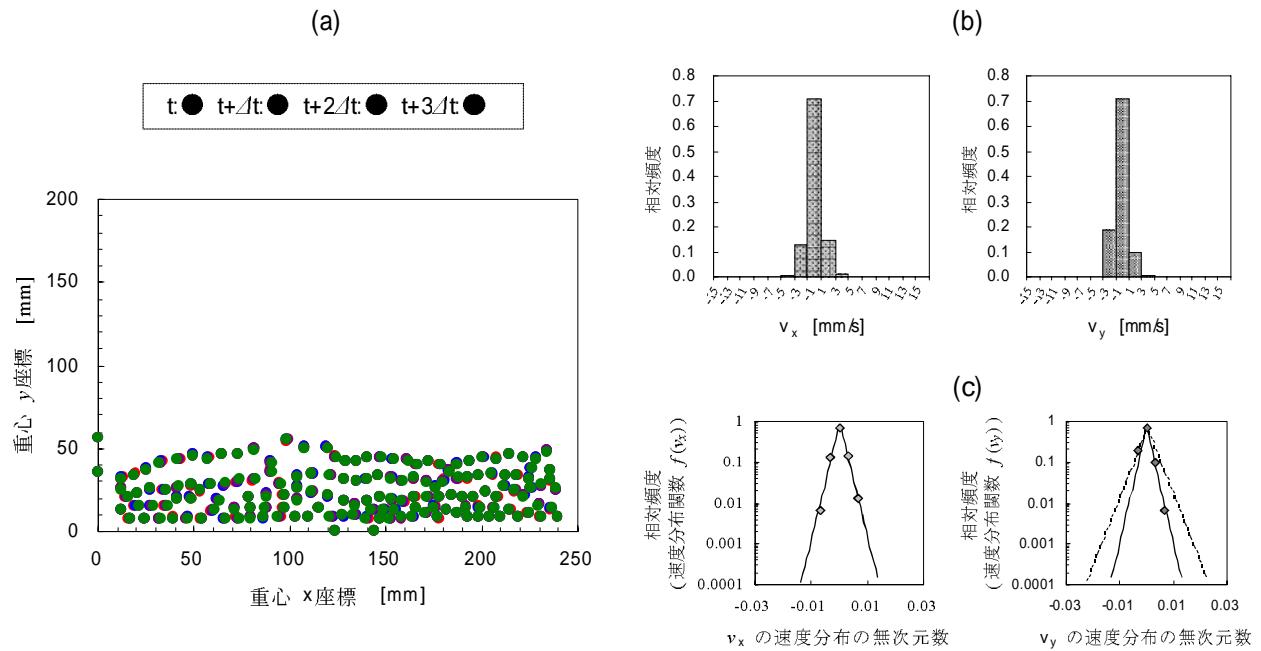


図4 粒子数154, 流量 $1.0\text{ l}/\text{min}$ の場合の実験結果. (a) 4時刻における粒子の重心位置 (b) v_x , v_y の相対頻度のヒストグラム (c) 指数分布関数による相対頻度のフィッティング

固液系 次元流動層における粒子の速度分布

表1 粒子数154の場合における速度分布関数の定数の実験値

流量	ケース	f(v_x) の定数			f(v_y) の定数					
					v_y > 0 (上昇粒子)			v_y < 0 (下降粒子)		
		α	c	A	β	d	B	β	d	B
2.0 ℓ/min	①	280	-0.001	0.432	180	0.0015	0.372	300	0.0015	0.400
	②	350	0.001	0.592	180	0.0015	0.407	340	0.0025	0.399
	③	270	0.00005	0.389	190	0.0035	0.387	300	0.0035	0.400
	平均	300	0.00002	0.471	183	0.0022	0.389	313	0.0025	0.400
1.5 ℓ/min	①	300	0	0.502	250	0.0015	0.535	420	0.0015	0.511
	②	370	-0.00050	0.574	360	0.0020	0.835	540	0.0020	0.763
	③	410	-0.00060	0.664	280	0.0018	0.657	500	0.0018	0.670
	平均	360	-0.00037	0.580	297	0.0018	0.676	487	0.0018	0.648
1.0 ℓ/min	①	650	-0.00020	0.937	380	0	0.684	650	0	0.723
	②	600	0	0.741	550	0	0.760	780	0	0.677
	③	550	0.00030	0.848	480	0.0008	0.953	750	0.0008	0.928
	平均	600	0.00003	0.842	470	0.0003	0.799	727	0.0003	0.776

$$f(v_y) = J \exp \left\{ -\gamma \left(\frac{v_y}{U_0} + p \right)^2 \right\} \quad (3)$$

で表される。

流量が 1.5 ℓ/min および 1.0 ℓ/min の場合の解析結果を図6 および図7 に示す。1.5 ℓ/min の場合、水平方向についてはほぼ左右対称な t 分布、鉛直方向についてはばらつきが大きいもののほぼ上下対称な指數分布で近似できることがわかる。ここで、水平方向の分布関数 $f(v_x)$ (t 分布型) は

$$f(v_x) = \left\{ K + m \left(\frac{v_x}{U_0} + \xi \right)^2 \right\}^{-n} \quad (4)$$

で表される。

1.0 ℓ/min の場合、速度自体が小さくなるため速度区分の数が少なく、近似をすることが難しいが、水平方向についてはほぼ左右対称な t 分布、鉛直方向については上下で非対称な t 分布で近似されることがわかる。なお、鉛直方向についての分布関数 $f(v_y)$ (t 分布型) は

$$f(v_y) = \left\{ R + s \left(\frac{v_y}{U_0} + \eta \right)^2 \right\}^{-w} \quad (5)$$

で表される。

4 粒子速度分布についての考察

まず、水の流速および駆動力について考察する。

流速の平均値は

《平均流速=流量/テストセクションの断面積》として算出できる。テストセクションの断面積は $236 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm} = 1.53 \times 10^3 \text{ mm}^2$ であるので、流量が 2.0 ℓ/min, 1.5 ℓ/min, 1.0 ℓ/min のそれぞれの場合に 21.7 mm/s , 16.3 mm/s , 10.9 mm/s という値が得られる。ここで、流体密度 $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$, 粘性率 $\mu = 10^{-3}$, 粒径 $d = 6 \times 10^{-3} \text{ m}$, 流速 $v_f = 10^2 \text{ m/s}$ として粒子レイノルズ数 Re を求めると $Re = 60$ となる。これは明らかに 1 よりは大きいがさほどには大きくなないので、駆動力はストークス抵抗に空隙率 ϵ の単調減少関数 $f(\epsilon)$ を掛けた式 $3\pi (v_f - v) f(\epsilon)$ で近似的に表されるものと考える。ここで v [m/s] は粒子速度である。この駆動力が正味の重力 (=重力-浮力) とつり合うと考え、粒子密度 $\rho_p = 1.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ などの値を用いると、粒子速度の関数として $f(\epsilon)$ が算出できる。

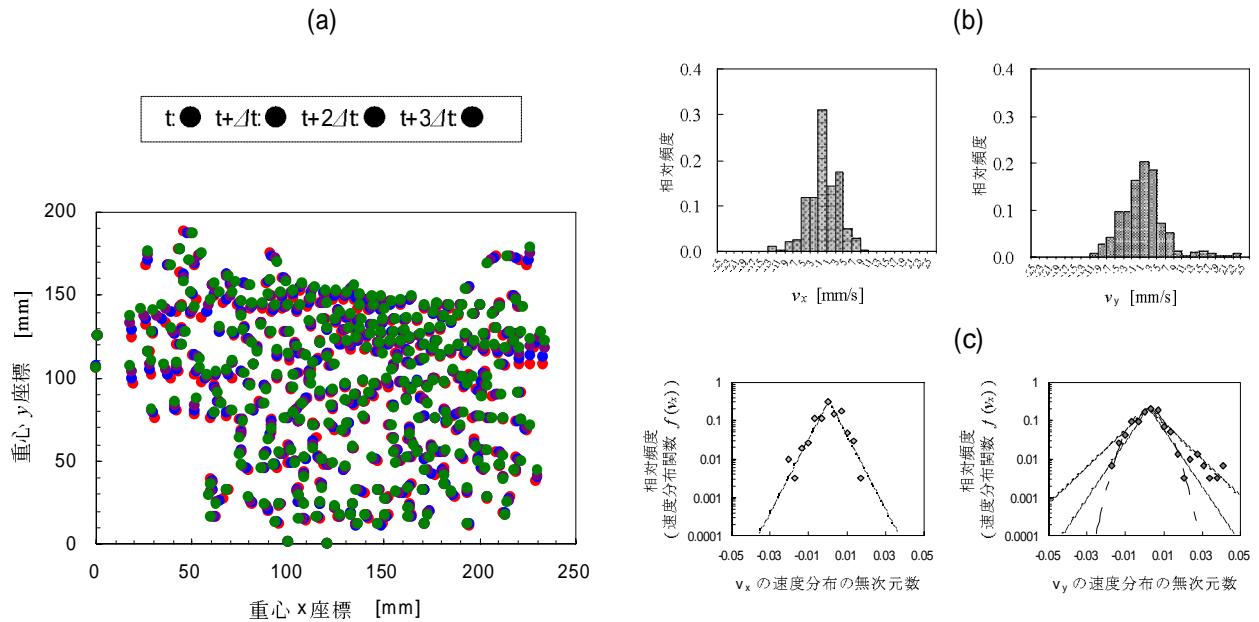


図 5 粒子数 308, 流量 $2.0\ell/\text{min}$ の場合の実験結果. (a) 4 時刻における粒子の重心位置 (b) v_x , v_y の相対頻度のヒストグラム (c) 指数およびガウス分布関数による相対頻度のフィッティング. $f(v_x)$ (指数型) における各定数は $\alpha = 220$, $c = 0$, $A = 0.333$. $f(v_y)$ ($v_y > 0$, 指数型) についても同様に $\beta = 110$, $d = -0.0015$, $B = 0.214$. $f(v_y)$ ($v_y < 0$, 指数型) については $\beta = 170$, $d = -0.0015$, $B = 0.220$. さらに $f(v_y)$ (ガウス型) の各定数は $\gamma = 10500$, $p = -0.0015$, $J = 0.202$.

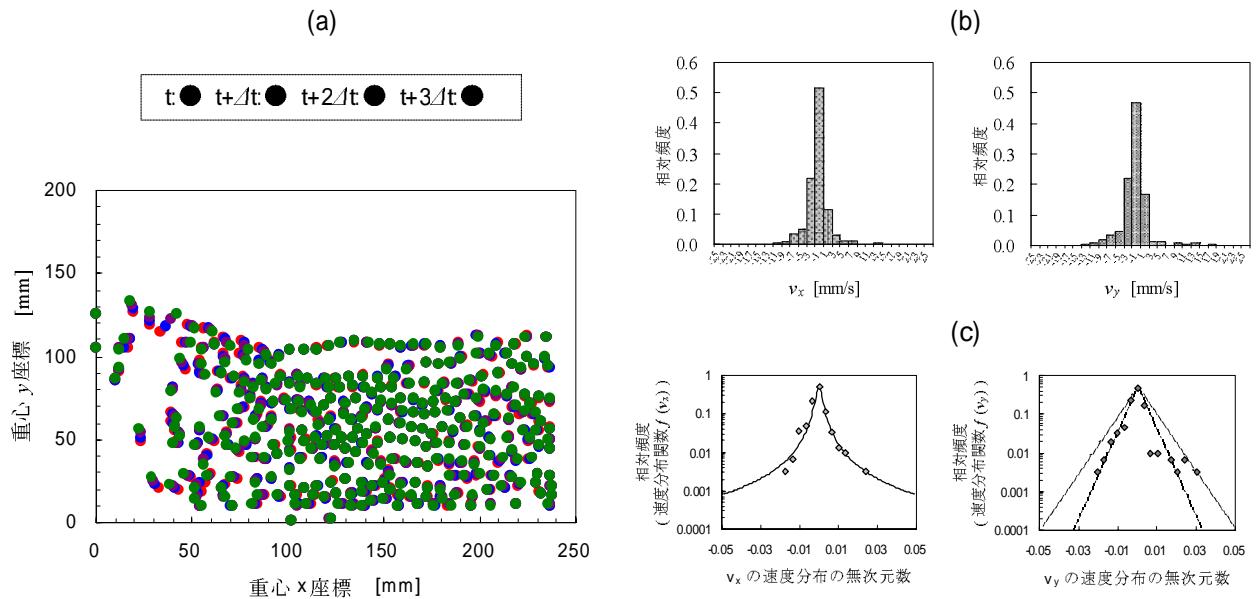


図 6 粒子数 308, 流量 $1.5\ell/\text{min}$ の場合の実験結果. (a) 4 時刻における粒子の重心位置 (b) v_x , v_y の相対頻度のヒストグラム (c) t -分布および指数分布関数による相対頻度のフィッティング. $f(v_x)$ (t -分布型) における各定数は $m = 75 \times 10^4$, $n = 0.95$, $\xi = 0$, $K = 1.00$. $f(v_y)$ ($v_y > 0$, 指数型) については同様に $\beta = 110$, $d = 0$, $B = 0.507$. $f(v_y)$ ($v_y < 0$, 指数型) については $\beta = 260$, $d = 0$, $B = 0.650$.

固液系 次元流動層における粒子の速度分布

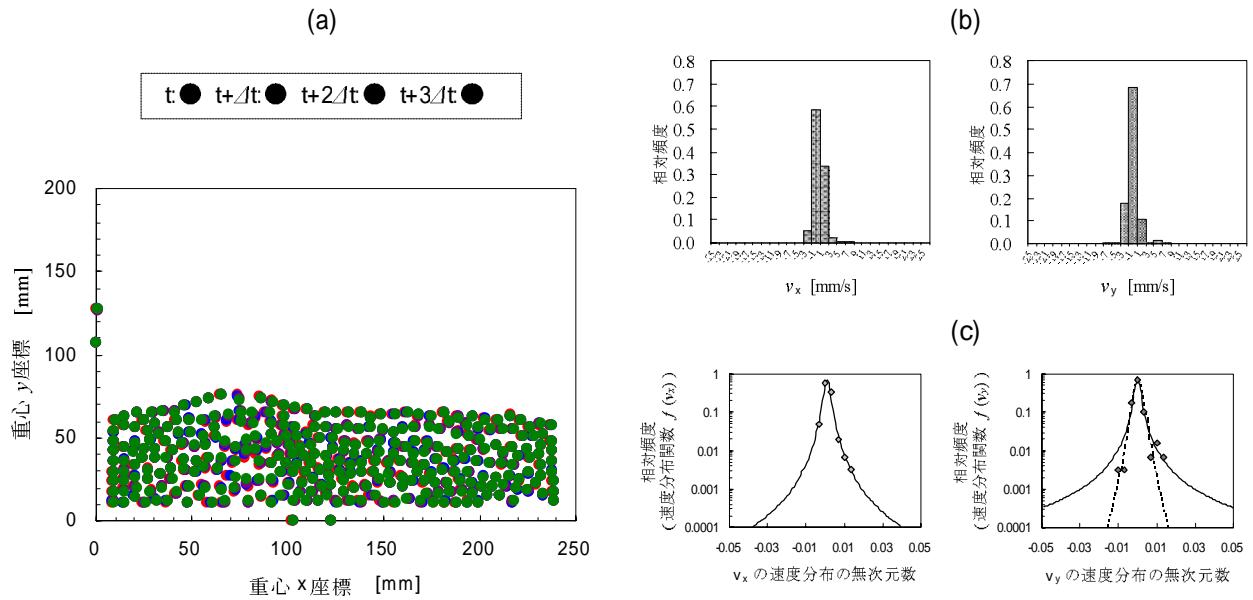


図7 粒子数308、流量 $1.0\ell/\text{min}$ の場合の実験結果. (a) 4時刻における粒子の重心位置 (b) v_x , v_y の相対頻度のヒストグラム (c) t -分布関数による相対頻度のフィッティング. $f(v_x)$ (t -分布型) における各定数は $m = 30 \times 10^4$, $n = 1.50$, $\xi = 0$, $K = 1.30$. $f(v_y)$ ($v_y > 0$, t -分布型) についても同様に $s = 60 \times 10^4$, $w = 1.1$, $\eta = 0$, $R = 1.25$. $f(v_y)$ ($v_y < 0$, 指数型) については $s = 5 \times 10^4$, $w = 3.5$, $\eta = 0$, $R = 1.12$.

粒子が密集した場所での粒子速度を $v = 1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ とすると, $f(\varepsilon) = 50$ が得られる. これは流体を介した粒子の相互作用効果であると考えられ, 後述する粒子濃度または空隙率の大きさから考えて妥当なオーダーであるといえる. 流速および駆動力についてはこのような考察ができるが, 実際に水の流速の測定を行うのが好ましいことは当然である. しかし, 本実験では粒子速度の測定を優先させたため, それを実行できなかった. この点については今後の課題としたい.

次に, 本研究で得られた粒子速度分布についての結果を, いくつかの先行研究の結果と比較しつつ考察しよう.

まず, Carlos & Richardson の実験⁹⁾では, 高さ約 1.2 m, 直径 12 cm の円柱状の容器に直径約 8.9 mm のガラス粒子 (トレーサー粒子の直径もほぼ同一) を入れ, 流体には Dimethyl phthalate (密度 1.19 g/cm^3 , 粘性率 10 cP) を用いた. 流速は $7.6 \sim 15.1 \text{ cm/s}$ に調整され, それに対応した粒子の速度は数 cm/s のオーダーで, 粒子レイノルズ数は $80 \sim 160$ であった. トレーサー粒子

の動きを 2.5 時間追跡することによって得られた速度分布は近似的にガウス分布 (マックスウェル分布) であった. また, Warr et al. の実験^{10, 11)}では, 直径 5 mm の数 10 個の鋼球が間隔 5.05 mm の平板間に詰められ, 振幅 $0.5 \sim 2.12 \text{ mm}$, 振動数 50 Hz の振動を加えられた. この粒子の運動が, 1 秒間に 1000 コマの撮影が可能な高速度カメラで記録され, 解析された. その代表的な実験結果によると, 粒子の速度は 1 m/s のオーダーで, 速度分布はガウス分布 (マックスウェル分布) で近似された.

本研究で得られた速度分布は上記 2 つの実験で得られた速度分布と明らかに異なっている. その違いを生み出した最大の要因は粒子速度 (または粒子レイノルズ数) および粒子が存在する領域の空隙率または粒子濃度にあると考えられる. そこで, 粒子の濃度と速度分布の関係を見るために, 各場合での粒子濃度を求めるこにする. ただし, どの場合も粒子はテストセクションの下部に集中しているため, 粒子の y 座標の最大値 y_{\max} を求め, (テストセクションの断面積) \times ($y_{\max} + \text{粒径}$)

を粒子存在部の体積とし、
《粒子濃度=粒子の全体積／粒子存在部の体積》
と定義する。このようにして求めた y_{max} および濃度をまとめると表 2 のようになる。なお、粒子数 154 の場合の各流量における y_{max} はそれぞれ 3 ケースの平均をとっている。

表 2 粒子の濃度と y 方向速度 v_y の速度分布
関数の型との比較

粒子数	流量 [ℓ/min]	y_{max} [mm]	濃度	v_y の 分布型
154	2.0	151.7	0.0723	指数型
	1.5	76.8	0.1376	指数型
	1.0	51.8	0.1972	指数型
308	2.0	188.0	0.1175	指数型 または ガウス型
	1.5	133.2	0.1637	指数型
	1.0	76.1	0.2776	指数型 または t-型

この結果を見る限り、粒子の濃度と y 方向速度分布の種類の間には 1 対 1 の関係があるようには思われない。本研究のように、粒子を狭い範囲に閉じ込めた場合、速度分布を決定する要因として濃度以外に容器の形状や拘束条件が大きく影響していると考えられる。そこで比較の対象として、容器の形状や拘束条件の重要性を示した Ichiki and Hayakawa によるシミュレーション結果⁵⁾を採り上げてみよう。彼らは固気系流動層において、レイノルズ数 $Re \ll 1$ 、ペクレ数 $Pe \gg 1$ の場合について、Stokes 流中の粒子の速度分布をシミュレーションで求めた。彼らの結果によれば、速度分布関数は全体のセル形状（容器形状）および粒子に対する拘束の強さに依存する。数 10 個の粒子を含む正方形セルに周期境界条件を適用した場合にはガウス分布、正方形セルで境界に固定粒子がある場合には指數分布、縦に細長い長方形セルで周期境界条件を適用した場合には t-分布が得られ

ている。本研究が対象とする系の場合、前述のとおり $Re = 60$ であり、また、ペクレ数 $Pe = O(10^{12})$ となるので、Ichiki and Hayakawa の結果と定性的に比較することが可能であると考える。

今回の結果では、粒子数 154 の場合については調べたすべてのケースについて指數分布が得られたが、これは Ichiki and Hayakawa の正方形セルに固定粒子がある場合の結果と一致している。ここで、同論文中の粒子群のスナップショットを見ると、正方形セルで固定粒子がある場合には、粒子はセルの下部に多く分布している。興味深いのは、この分布の状況が図 2 (a)、図 3 (a)、図 4 (a) に示す本研究で得られた粒子群のスナップショットと良く似ているという点である。すなわち、固液系、固気系の違いに関わりなく、粒子の速度分布は粒子群の配置ないしは高度分布と強い相関を持っていると考えられる。

一方、粒子数 308 の場合は、流量によって分布の種類が異なる様相を示す。ここで、その理由を考察してみよう。まず、粒子数が多いと、一様流動層（一様な濃度分布）が不安定になり、テストセクション内にチャンネル（流路）が形成されやすいということが考えられる。例えば、流量が 2.0 ℓ/min の場合には、図 5 (a) に示されるように、テストセクションの両サイド部分に粒子はほとんど存在せず、幅の広いチャンネルが存在している。この両サイド部分を除くと、粒子の存在域は正方形に近くなっていて、粒子速度は小さい。これが、粒子速度の小さな領域で速度分布がガウス的になっている理由であると考えられる。また、両サイド部分に存在する粒子が水の大きな流速に吹き上げられて大きな速度を持っているために、粒子速度の大きな部分での粒子の相対頻度が高くなっていると考えられる。このようにして、図 5 (c) のような複雑な分布が得られる理由を説明できる。

粒子の高度分布は、粒子の鉛直方向の速度分布における上下方向の非対称性にも影響を与えている。粒子数 154 のすべての場合および粒子数 308 で流量 1.5 ℓ/min の場合に上下非対称な指數分布が得られている。その理由として、粒子がテストセクション下部に偏って存在していると考えられる。すなわち、上層付近の粒子が上向きには妨げられず自由に動けるのに対し、すべての粒子

固液系 次元流動層における粒子の速度分布

が下向きの方向には他の粒子もしくはテストセクション下底に運動を妨げられて大きな速度を獲得しづらいためであると説明できる。

粒子数 154 の場合の指数分布における指數と流量 Q の関係を図 8 に示す。ここで、縦軸に指數分布関数の定数 α , β_u ($v_y > 0$), β_d ($v_y < 0$) をいずれも $Q = 2.0 \text{ l/min}$ の場合の値で規格化したもの、横軸に流量 Q の逆数 $1/Q$ をとった。この図より、流量が小さいほど α , β_u , β_d が大きくなること、すなわち大速度の粒子比率が小さくなること、そして、鉛直方向の運動についてその傾向が特に顕著であることがわかる。

最後に、実験装置本体の容器形状を 2 次元とした点についての影響、すなわち平板の影響について述べる。粒子は流体を介して平板と衝突すると考えられる。衝突によって粒子速度の x 成分も y 成分も減少すると考えられるが、ここでその大きさを推定してみよう。平板近傍に境界層が存在するとして、境界層の厚さを δ 、粒子の存在域の y 方向への広がりを I 、境界層外部の平均流速を U 、境界層内部の平板に垂直な速度成分を v 、レイノルズ数 Re とすると $\delta/I = O(Re^{-1/2})$, $v/U = O(Re^{-1/2})$, $Re = \rho U I / \eta$ である。水の密度 $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、粘性率 $\eta = 10^{-3}$ 、また $U = 0.01 \text{ m/s}$, $I = 0.1 \text{ m}$ の各値を用いると $Re = 10^3$ となり、 $\delta \approx 3 \times 10^{-3} \text{ m}$, $v \approx 3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ が得られる。平板への衝突による、粒子の平板に平行な速度成分における損失は v と同程度であると考えると、速度成分の区分幅である

2 mm/s よりも小さい。よって、得られた分布に対し平板は大きな影響を及ぼさないと考えられる。

5 おわりに

本研究の主要な結論は次のようにまとめられる。

(I) 適当な時間間隔をおいた 4 つのビデオ画像を利用する方法により、固液系 2 次元流動層における粒子の速度分布を求める成功した。すなわち、まず適切な時間間隔を設定し隣り合う時刻の画像同士の比較を行っていくことにより、すべての粒子を同定しつつ動きを追跡することを可能にした。さらに、それらの粒子について 1 番目の画像での位置と 4 番目の画像での位置を比較して速度を求ることにより、データ処理に伴う相対誤差を小さくし、かつ速度データの数を多くすることを可能にして、速度分布関数を求めやすくすることができた。

(II) 3 通りの流量、2 通りの粒子数に対して、水平方向および鉛直方向の粒子の速度分布を求めることができた。その結果は、粒子数が比較的少ない場合は、水平方向は左右対称な指數分布関数、鉛直方向は上下非対称な指數分布関数で近似できることがわかった。指數の大きさは流量が大きいほど小さく、鉛直方向の速度分布の指數は上向きの場合のほうが下向きの場合よりも小さいことがわかった。粒子数が多い場合には、流量によりガウス分布、t 分布も得られることがわかった。

おわりに、本研究を進めるにあたって、有益なご助言をいただいた神戸芸術工科大学の高木隆司教授に感謝の意を表する。

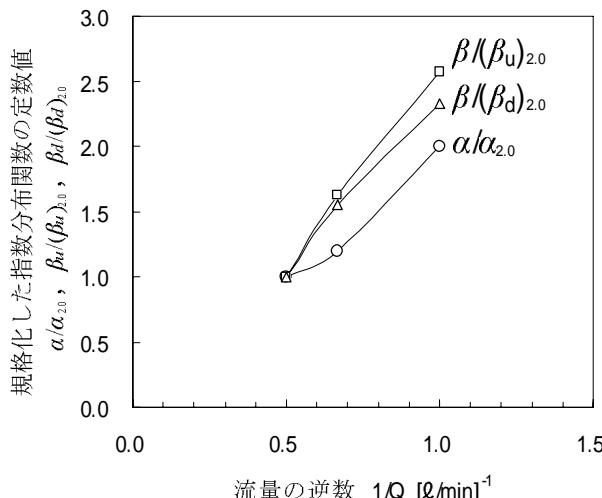


図 8 指数分布関数の定数値の流量依存性。
粒子数は 154。

引用文献

- 1) E. L. Grossman, T. Zhou & E. Ben-Naim : Towards granular hydrodynamics in two dimensions, Phys. Rev. E 55 (1997) 4200-4206.
- 2) Y. Lan & A. D. Rosato : Macroscopic behavior of vibrating beds of smooth inelastic spheres, Phys. Fluids 7 (8) (1995) 1818-1831.
- 3) Y. H. Taguchi : $k^{-5/3}$ Power spectrum in Powder -Turbulent flow in a vibrated bed : Numerical results, Europhys. Lett. 24 (1993) 203-209.

- 4) Y. H. Taguchi & H. Takayasu : Power Law Velocity Fluctuations Due to Inelastic Collisions in Numerically Simulated Bed of Powder, *Europhys. Lett.* 30 (1995) 499-504.
- 5) K. Ichiki & H. Hayakawa : Dynamical simulation of fluidized beds : Hydrodynamically interacting granular particles, *Phys. Rev. E* 52 (1995) 658-670.
- 6) A. Samuelsberg & B. H. Hjertager : An experimental and numerical study of flow patterns in a circulating fluidized bed reactor, *Int. J. Multiphase Flow* 22 (1996) 575-591.
- 7) D. Gidaspow, Y. P. Tsuo & K. M. Luo : Compound and experimental cluster formation and velocity profiles in circulating fluidized beds, J. C. Grace, L. W. Schemilt & M. A. Beergougnou eds. *Fluidization IV* (New York : Engineering foundation, 1989) 81-88.
- 8) J. S. Lin, M. M. Chen & B. T. Chao : A novel radioactive particle tracking facility for measurement of solid motion in gas fluidized beds, *AIChE. J.* 31 (1985) 465-473.
- 9) C. R. Carlos & J. F. Richardson : Solid movement in liquid fluidi velocity distribution, *Chem. Eng. Sci.* 23 (1968) 813-828.
- 10) S. Warr, G. T. H. Jacques & J. M. Huntley : Tracking the translational and rotational motion of granular particles : use of high-speed photography and image processing, *Powder Tech.* 81 (1994) 41-56.
- 11) S. Warr, J. M. Huntley & G. T. H. Jacques : Fluidization of a two-dimensional granular system : Experimental study and scaling behavior, *Phys. Rev. E* 52 (1995) 5583-5595.