

# 球状粒子群への球状飛翔体の貫入および跳ね返り

名古屋工業大学 大学院工学研究科 西田 政弘<sup>1</sup>, 田中 皓一, 奥村 允

## 1 はじめに

粒子群への飛翔体の衝突現象は、物理学および粉体工学の諸分野で注目され、数多くの実験、理論、数値シミュレーションが行われている [1, 2, 3, 4] が、未だ不明な点も多い。著者らは、これまで粒子群への飛翔体の衝突現象について、2次元および3次元に規則配列もしくはランダム配列させた球状粒子群を用いた実験および離散要素法シミュレーションにより研究を進めてきた [5, 6, 7]。本研究では、容器内にランダムに充填された粒子群への飛翔体の衝突現象を、2台の高速度ビデオカメラを用いた撮影により調べた結果を報告する。特に、粒子群への飛翔体の貫入や粒子群からの飛翔体の跳ね返りに与える飛翔体の衝突速度、角度および粒子群を構成する粒子の直径の影響について調べた。

## 2 実験方法

本研究で用いた実験装置を図1に示す。塩化ビニル (PVC) 製の四角形容器の中にナイロン球 (直径 4.76 mm および 6.35 mm) をランダムに充填し、その上方から鋼球飛翔体 (直径 9.52 mm)

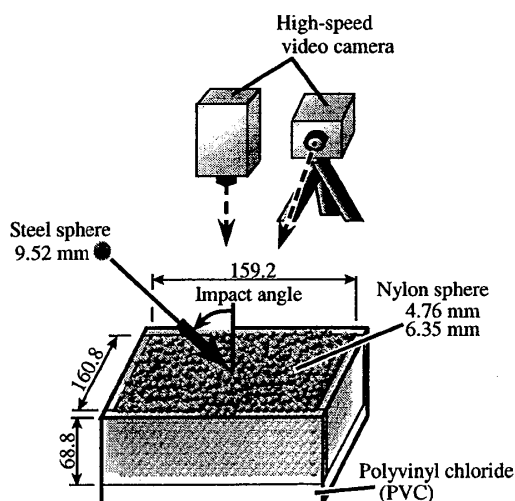


図 1: 衝撃実験装置 (衝撃角度は垂直衝撃を  $0^\circ$  とした)。

<sup>1</sup>E-mail: nishida.masahiro@nitech.ac.jp

	Diameter of spheres	Number of spheres	Porosity
System A	4.76 mm (1/4 inches)	19000	42%
System B	4.76 mm (1/4 inches)	5000	43%
	6.35 mm (3/16 inches)	5000	
System C [7]	6.35 mm (3/16 inches)	8000	42%

表 1: 衝撃実験に用いた 3 種類の粒子群。

を種々の速度 (1~20 m/s) および角度 (0~65°: 垂直衝突が角度 0°) で衝突させた。そのときの挙動を 2 台の高速度ビデオカメラ (Redlake: MotionScope 1000S および PCI2000S) により、側面および上方から、毎秒 500 コマ、シャッタースピード 1/1000 秒で撮影した。考察に用いた粒子群は、表 1 に示すような 3 種類で、直径 4.76 mm を 19000 個充填した System A、直径 4.76 mm と直径 6.35 mm をそれぞれ 5000 個ずつ充填した System B と、比較のために以前実験を行った直径 6.35 mm を 9000 個充填した System C [7] である。これらは充填体積がほぼ同じになるように粒子数を決めた。粒子群の空隙率は、System A と C が 42%、System B が 43% で、System A、B、C はほぼ同じであった。衝撃実験には同じ粒子を何度も使ったが、実験ごとに粒子を充填し直し、表面を平らにした後、実験を行った。なお、衝突速度および衝突角度は高速度ビデオカメラで撮影された画像から求めた。

### 3 実験結果および考察

飛翔体が 3 種の粒子群に、角度約 60°、速度約 16m/s で衝突した場合の実験結果を図 2 に示す。側面から撮影した画像を比較すると、ほぼ同じ衝突速度、つまり同じ運動エネルギーにも関わらず、粒子群の飛散量が異なっており、飛散量が多い順に System A > System C > System B になっているように見える。飛翔体の挙動に注目すると、すべての場合で粒子群の表面で跳ね返っており、System A では衝突後約 30 ms に飛翔体が容器の右側に達している (図中○印) のに対し、System B および C では衝突後約 20 ms で既に飛翔体が容器外に達している。また、飛翔体の跳ね返り速度も画像から求めると、System A: 3.5 m/s、System B: 5.8 m/s、System C: 4.3 m/s となり、System A では、衝突直前に飛翔体がもつ運動エネルギーのうちの大部分が粒子群の運動エネルギーとなり、そのため粒子が最も多く飛散したと考えられる。

上方からの撮影結果を比べると、粒子群の表面に形成された窪み (クレータ) の形状も、System A、B、C で異なっているように見える。System A は他の 2 つに比べ、窪みが最も深く大きい。40 ms の画像を見ると、System A と C では窪みの外縁が容器の右側面まで達しているのに対し、System B では容器のどの側面にも達していない。これらの傾向は、粒子の大きさや撮影時のライティングにより映り方が変わるため、今後は窪みの形状を測定し定量的に比較することにより、窪みの形成過程を明らかにする必要がある。

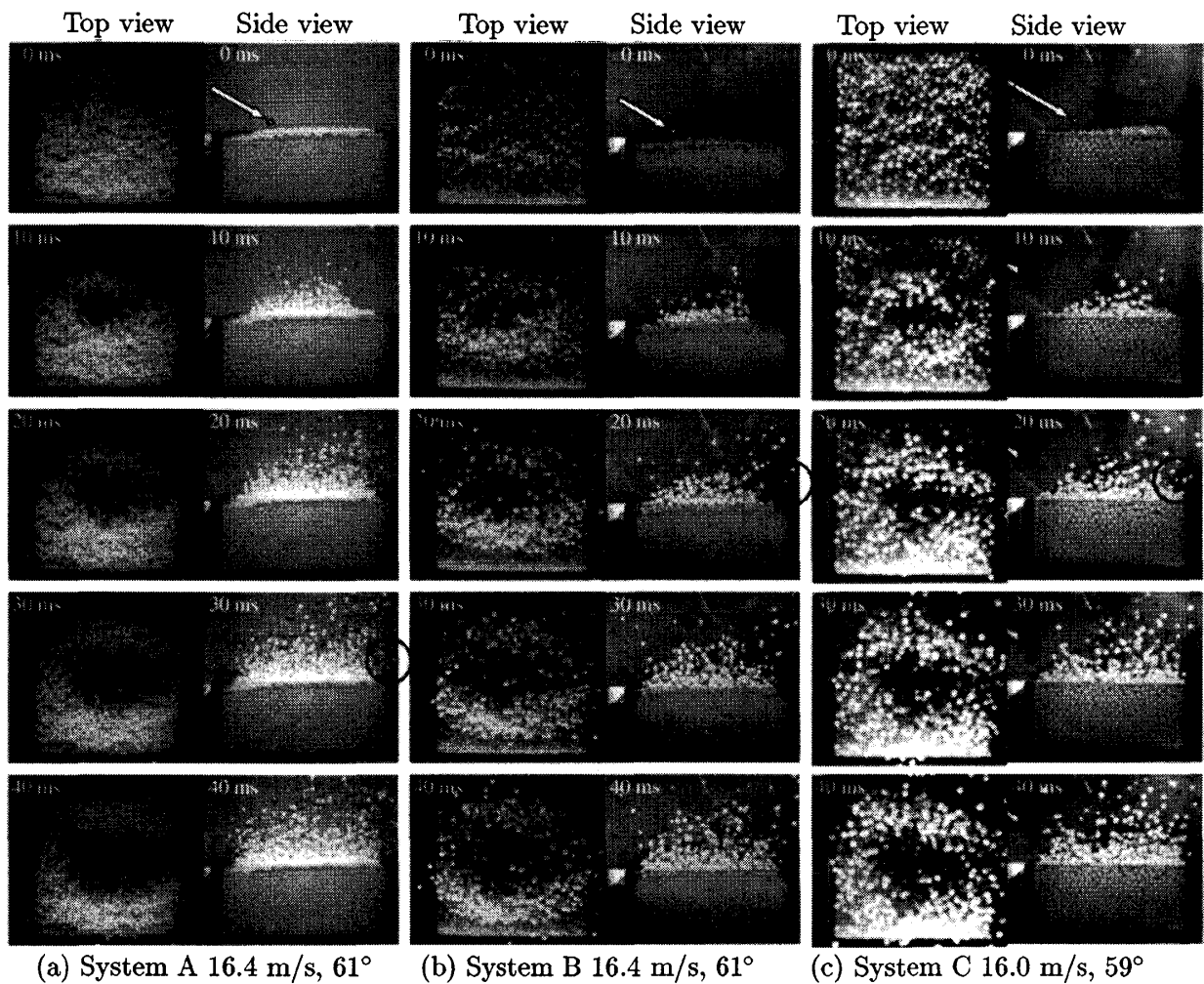


図 2: 高速度ビデオカメラで撮影した飛翔体および粒子群の挙動。飛翔体は直径 9.52 mm の鋼球。

上記の結果の再現性を確認するため、ほぼ同じ条件で実験を行い、衝突速度  $16 \pm 1.0$  m/s、衝突角度  $60 \pm 3^\circ$  の範囲にあり、飛翔体が跳ね返った 5 回の実験結果を比較したところ、System C では跳ね返り速度のばらつきが大きいものの、跳ね返り速度の大小関係はほとんどの場合で上記の順番と同じであった。さらに多くの実験を行ったところ、System A では 10 回中 5 回くらいの割合で飛翔体が粒子群から跳ね返り、残りは飛翔体が表面に沿って水平に進み容器壁に衝突したのに対し、System B では 10 回中 7 回くらいの割合で跳ね返り、3 回くらいは表面に沿って水平進んだ。System C は、全ての実験で飛翔体は粒子群の表面で跳ね返った。これらから、3 種の中では、System A が最も跳ね返りにくく（逆に言うと、貫入しやすく）、次に、System B、C の順に跳ね返りやすく（貫入しにくく）なっていることがわかる。この結果は、図 3 に示す衝突後の飛翔体の挙動の結果と同じことを示している。図 3 から、System A、B は貫入する（図中▼印）か否かは、速度によらず角度のみに依存し、System A では  $0 \sim 50^\circ$  の広い範囲で貫入し、3 種類の粒子群の中で最も貫入しやすく、System B では  $0 \sim 40^\circ$  の範囲で貫入することが分かる。System

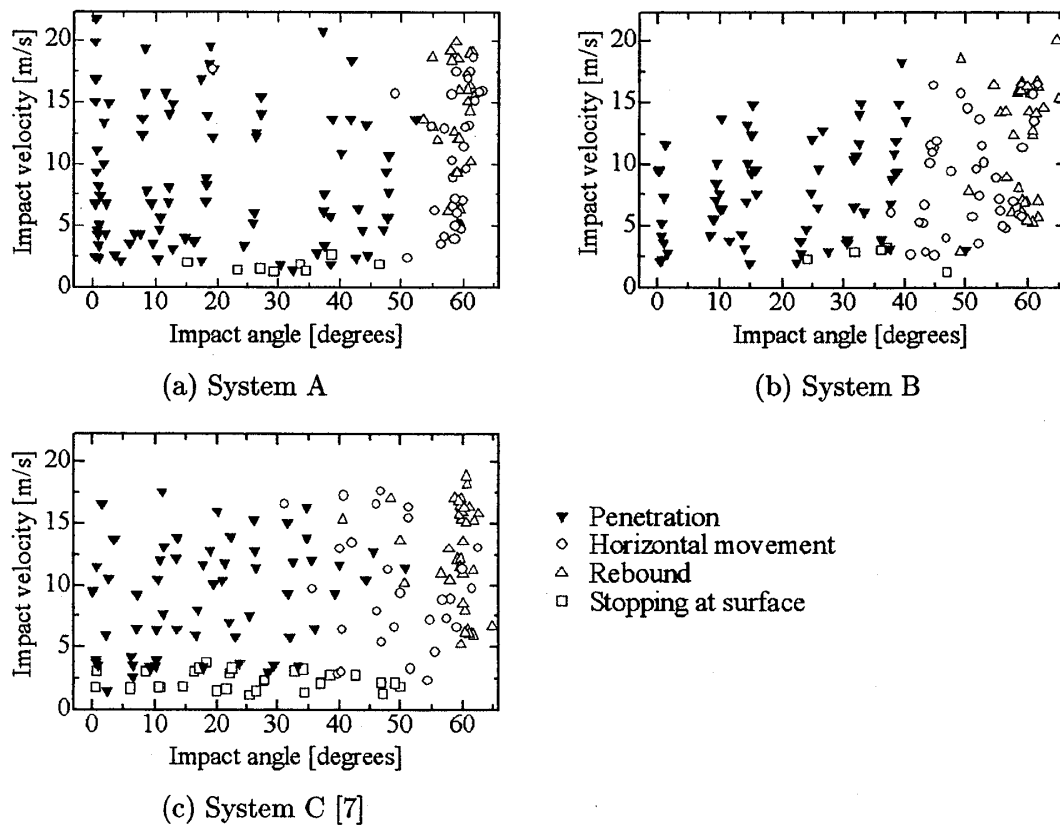


図 3: 衝突後の飛翔体の挙動。

Cは  $0 \sim 40^\circ$  の範囲で貫入したが、 $12 \text{ m/s}$  程度の速度では  $50^\circ$  でも貫入する場合があった。

今後は、飛翔体と粒子群の密度比、直径比を変え、それらが粒子群の衝撃挙動に与える影響を調べる必要がある。また、充填率や空気、重力の影響も重要である。

## 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費補助金 若手研究 (B) (課題番号 17760077) による補助のもとで行われた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] R. Rioual, A. Valance, D. Bideau, *Phys. Rev. E* **62**, (2000), 2450.
- [2] R. Rioual, A. Valance, D. Bideau, *Eur. Phys. Lett.* **61**, (2003), 194.
- [3] L. Oger, M. Ammi, A. Valance, D. Beladjine, *Eur. Phys. J. E* **17** (2005), 467.
- [4] D. Lohse, R. Rauhe, R. Bermann and D. van der Meer, *Nature* **432** (2004) 689.
- [5] K. Tanaka, M. Nishida, T. Kunimochi and T. Takagi, *Powder Technology* **124** (2002), 160.
- [6] M. Nishida, K. Tanaka and Y. Matsumoto, *JSME Int. J. A* **47**(3) (2004), 438.
- [7] M. Nishida, K. Tanaka and Y. Matsumoto, *SPIE* **5580**, (2005), 34.