

一様励起粉体ガスの緩和ダイナミクス

東京大学 理学系研究科 物理学専攻 辰己 創一¹, 村山 能弘, 佐野 雅己

流動化した粉粒体系において, その特に希薄で, 外部との相互作用が無い状態, 冷却状態の統計性は古くから研究の対象となってきた [1, 2, 3]. 今までは様々な制約から実験的に冷却状態を観察することはなかなか実現していなかったが, 私たちは本研究を通じて, 粉体ガスの冷却状態の観察を行うことに成功した. その結果は容器の形状によるものの, 従来の理論との予測に整合するものであり, 気体分子運動論的な考察の正当性を示す結果となった. また容器の形状による差異も本質的に系の持つ実効的な熱浴的な効果の取り扱いと密接に関わっており, 非常に重要な結果である.

1 はじめに

粉粒体は外部励起によって, 流動化した状態へと遷移する. その流動化状態は系自体の持つ散逸性によって一般に永続することは無いが, 雪崩や土砂崩れに代表されるように, 外部励起を与え続けることによってその流動化状態が保たれたり, 宇宙空間に漂う微小な塵の集合のように, 外部励起は無いがその希薄性から一様な流動化状態が長く保たれるような事がある. こういった状態は普通の気体とのアナロジーから粉体ガスと呼ばれ, 特に一様等方な理想化された系についての研究がなされてきた [1, 2, 3]. そのうち前者のように外部励起と散逸がバランスしている状態は”定常状態”と呼ばれ, 後者のように外部励起が無く, 散逸によって系が一様に停止状態へと向かっている状態は”冷却状態”と呼ばれている.

これらの統計性は特に理論的には気体分子運動論の散逸系への拡張, という立場からの研究が多くなされ, その統計則について有用な予測がなされるに至っている [2]. こういった理論の多くは, 粒子間の主たる散逸として非弾性衝突を仮定しており, それは希薄極限という前提の下においては良い近似であると考えてよい. しかしながら, その予測と実験との整合性に関しては, 前者, ”定常状態”に関しては一致するときとしない時が両方存在し, その隔たりに対する明確な理由はわかっておらず, 一方後者, ”冷却状態”に関しては, 一様性の確保や, 停止状態への早い遷移などの問題により, 決定的な実験はなされていなかった.

我々は, 非弾性衝突以外の効果, 摩擦, 粒子の非一様性等を極力抑える実験を行うことにより, ”定常状態”について理論において仮定されている実効的な熱浴の果たす役割を明らかにし, また”冷却状態”についても熱浴の効果が無視できない状況が存在することを示唆する結果を得た. ここでは特に”冷却状態”について, その詳細を報告する.

¹E-mail: tatsumi@daisy.phys.s.u-tokyo.ac.jp

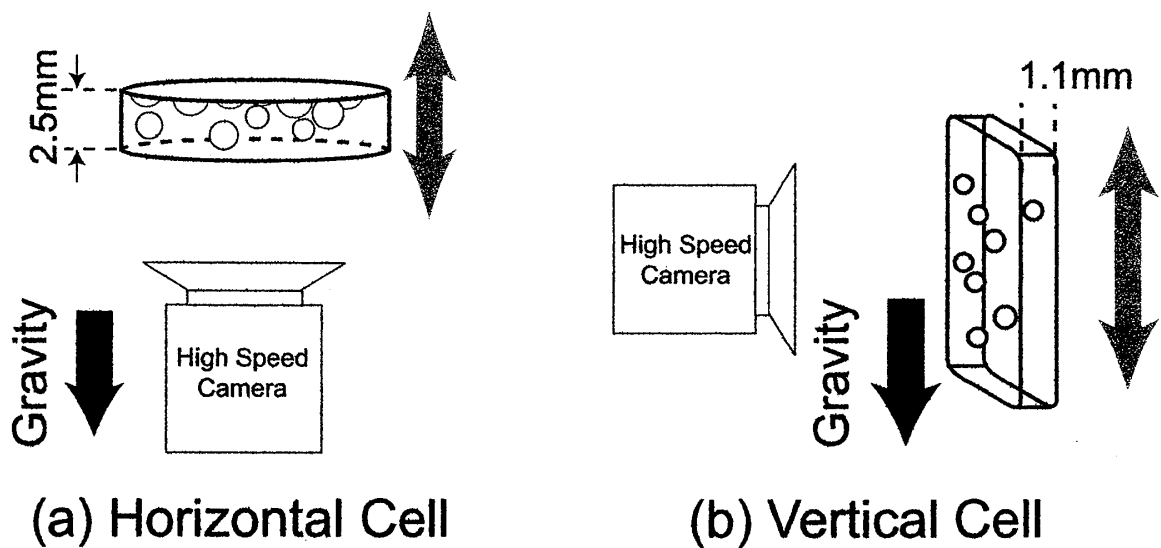


図 1: 実験系の概念図

2 実験系

本実験は、図 1 に示すように、2 種類の擬 2 次元セルを使用して行った。水平セル (Horizontal Cell) 実験においては、高さ 2.5mm 、直径 80mm の円筒セル内に粉体粒子を詰め込み、水平に置いて鉛直に加振することによってガス状態を実現している。なおこのセルの上面には直径約 1mm のガラスビーズが満遍なく貼り付けてあり、粒子はこのガラスビーズに衝突することによって運動が乱雑化される。一方垂直セル (Vertical Cell) 実験においては、奥行き 1.2mm 、高さ $50\text{mm} \times$ 横 70mm の直方体セルを使用し、同じように鉛直に加振して粒子間衝突によって運動を乱雑化している。作業粉体としては粒径 $1\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ のジルコニアビーズを使用した。ジルコニアビーズと水平セルの下面、および垂直セルの壁面に使用したガラスとの間の跳ね返り係数は 0.98 である。

ここで、冷却状態の観察においては、特に垂直セルにおいては重力のため冷却開始後直ちに落下を開始し、満足な冷却状態の観察が出来ない。また水平セルにおいても、落下による停止は無いものの、重力下では垂直抗力のために摩擦力がすぐに強く働きだすことが想定される。その為、放物飛行を利用した微小重力状態を利用することにより重力の効果を防いだ。具体的な実験時の微小重力の精度は $\pm 0.1\text{m/sec}^2$ に保たれている。水平セルにおいては、地上実験においても冷却状態の観察を行っているが、この際に、ガラス面を下面にすることにより冷却状態に突入した粒子が、ガラス面の上を転がれるようにして摩擦の効果を抑えている。

解析は高速度カメラにより全ての粒子の軌跡を画像解析によって取得、追跡する方法、Particle Tracking Velocimetry によって行った。時間分解能は 1msec 、画像分解能は $7\mu\text{m}$ である。また実験の性質上、系の熱速度は時間的に減衰する。その為に速度分布関数による解析を行う際、単純にその速度の累積分布を取得したのでは正しい速度分布は得られない。そこで速度を各時刻の熱速度で規格化する事で、規格化された速度にのみ着目した解析を行った。

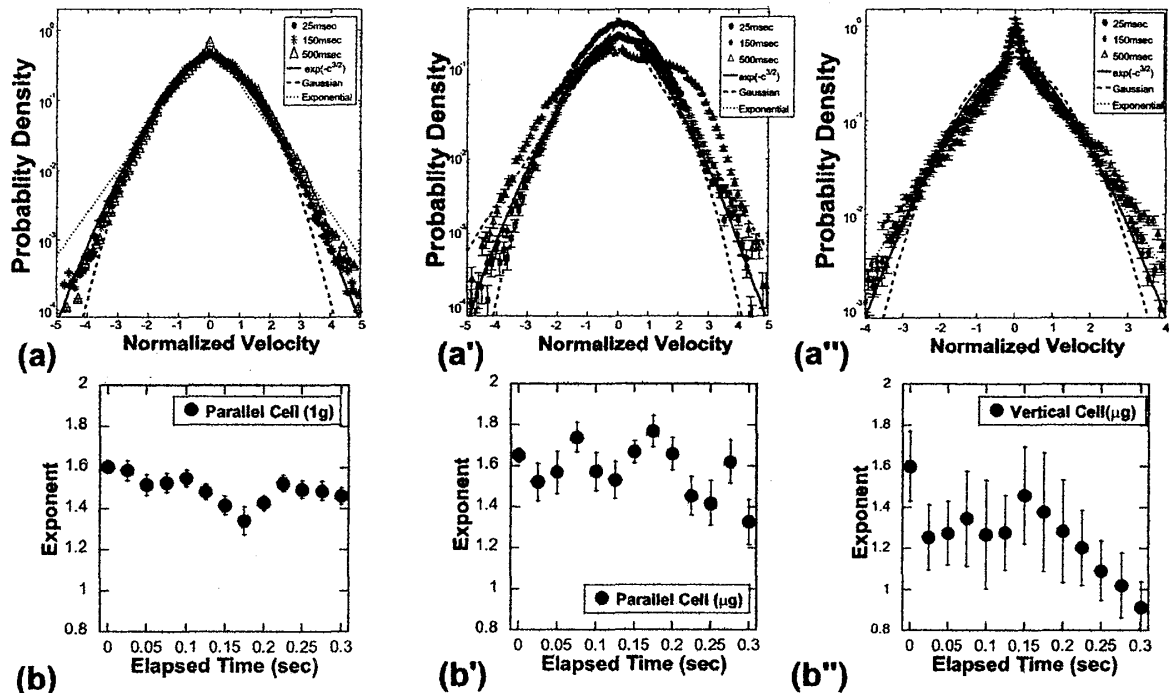


図 2: (a) 水平セル (重力下)(a') 水平セル (微小重力下)(a'') 鉛直セル (微小重力下)(b-b'') それぞれの指数の時間変化。微小重力下の水平セルで時間の最後のほうでデータが乱れているのは、試行回数を多くとれずに最後まで水平のあっているデータを取れなかったことによる。

3 冷却状態

今回実験した系において、定常状態の速度分布関数は $f(c) \propto \exp(-\beta c^{1.5})$ (β は適当な定数, c は規格化された速度) という形をとる。これは水平セルでも垂直セルでも同じであるが、冷却状態にした後の速度分布関数の振る舞いは大きく異なる。図 2a-a' に見られるように、水平セルにおいては、冷却状態においても、定常状態と同じ速度分布関数を保つが、図 2a'' のように、垂直セルにおいては速度分布関数の形が速やかに変化して、指数的になる。以上の事を定量的に示したのが、図 2b-b'' である。ここでは、速度分布関数を $f(c) \propto \exp(-\beta c^\alpha)$ と仮定し、 α 、即ち速度分布関数の指数を未定定数として関数のあてはめを行い、 α を冷却状態突入後の経過時間の関数として図示している。以上より、冷却状態においては、容器の形状、即ち初期条件によって、その後の速度分布関数の振る舞い変化していることがわかる。

このような違いが生じた原因として、水平セルと垂直セルの大きな違いとして、容器の深さ方向への粒子の速度の大きさがあげられる。垂直セルにおいては容器の深さ方向への速度はほぼ 0 であり、無視できるレベルであり、そちらからの寄与はほぼ無いと考えてよい。つまり、外界との接触が完全に絶たれる、という意味で非常に良い“冷却状態”を形成している。しかし一方、水平セルにおいては容器の深さ方向へ大きな速度を持った初期条件からスタートする。そのために実験系全体としては外界との接触はないが、注目している系の内部において、容器の深さ方向への

速度が平面方向への速度へと転化が起こる状態となっている。これは系に実効的な熱浴が加わっていることを意味していると考えられる。

以上の推論は理論による予測との比較からも伺える。冷却状態の速度分布関数は、分子運動論的な立場から非弾性衝突のみを仮定し、外界との接触が無い状況で予測された [4]。この状況はほぼ垂直セルによって実現された冷却状態と合致し、その速度分布関数も指数となり、整合性が非常に良い。一方、水平セルの結果はその理論の予測と合致しないが、それについては定常状態の速度分布関数の理論による予測 [2] が示唆的である。そこでは定常状態の理論からの予測において、暗黙に何らかの熱浴の存在を仮定しており、その熱浴の存在が速度分布関数の指数を水平セルで得られたような、1.5 というものにしている。つまり今回の水平セルにおいては、系において、深さ方向への大きな速度が実効的に熱浴の役割を果たしていると考えられ、そのために定常状態と同じような速度分布関数が得られたと考えられる。

4 まとめ

本研究において、粉体ガスの冷却状態についての実験を行うことに成功した。その結果は実験系、容器の構造によって異なる結果となったが、この事は系の熱浴的な働きの重要性を示唆していると考えられ、非常に重要な結果である。特に、熱浴的な要素を完全に排除した系においては、理論の予測とほぼ一致する結果が得られ、希薄領域の粉体ガスを分子運動論的な立場で取り扱うことへの積極的な証拠となったと考えられる。今後、さらに巨視的な量と、速度分布関数のような微視的な量がどのように関わってくるのか調べるのが非常に重要になるであろう。

参考文献

- [1] P. K. Haff. Grain flow as a fluid-mechanical phenomenon. *J. Fluid Mech.*, 134:401–430, 1983.
- [2] T. P. C. van Nöije and M. H. Ernst. Velocity distributions in homogeneous granular fluids: the free and the heated case. *Granular Matter*, 1:57–64, 1998.
- [3] Florence Rouyer and Narayanan Menon. Velocity fluctuations in a homogeneous 2d granular gas in steady state. *Phys. Rev. Lett.*, 85(17):3676–3679, 2000.
- [4] Nikolai V. Brilliantov and Thorsten Pöschel. *Kinetic Theory of Granular Gas*. OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2003.