

ダストカーテンを横切る飛翔体まわりの現象に関する実験

○鈴木 宏二郎（東大新領域）、正木 千尋（東大院）、渡邊保真（東大工学系）

Experimental Study on Granular Flow around a Projectile Flying across Dust Curtain
Kojiro Suzuki, Chihiro Masaki and Yasumasa Watanabe (Univ. of Tokyo)

Key Words: Ballistic Range, Dust, Collision, High-speed Camera, Shock Wave, Wake

Abstract

The granular flow around a projectile flying across a sheet of dust particles was experimentally investigated by using the ballistic range. A poly-carbonate spherical projectile with the diameter 25.75 mm and the mass 4.3 g was launched at the velocity 420-470 m/s into the low pressure chamber at about 35 Pa. The dust curtain made from 0.2 or 0.4 mm diameter glass beads was formed in the test chamber by the free-falling device with a slit of 2 mm width and 600 mm length. The images obtained by the high-speed camera at 20,000 fps revealed collisions at the projectile surface with pulverization, formation of shock-wave-like structure in front of the body, formation of the wake in the absence of the dust particles and so on. The collision between the jet of the dust cloud and the dust curtain was also investigated.

1. はじめに

真空中でたくさんの粒子が群として振る舞い、その挙動がマクロに見てどのように説明できるかという問題は、流体力学的に大変興味深いテーマである。粒子だけの集合体は粉体流 (Granular Flow) として研究がなされているが、多くは比較的低速の現象を扱っており、衝突破壊を伴う高速粉体流れについては実験、理論とも解明が進んでいるとは言えない。本研究では、シート状のダストカーテンを飛翔体が高速で横切る様子を高速ビデオで観察した。

2. 実験装置の概要

実験は、二次元シート状に落下するダスト粒子群に飛翔体を発射して、それがダストカーテンを横切る際の挙動を高速ビデオで記録する方法で行った。サンドブラストガンでダスト風洞を作って物体に衝突させる方法もあるが、その場合は噴射用の気流の存在により固気二相流となってしまうため、今回は採用しなかった。

飛翔体は研究室所有のバリストックレンジにより発射される。全長約6m、内径25.75mmの発射管を持ち、高圧室の充填圧は最大0.9MPa（ゲージ）である。ダストカーテンを生成するため、測定室内に、図1に示す二次元漏斗状のダスト落下装置[1]を設置した。漏斗の底部には幅2mm、全長600mmのスリットがあり、外部からの指令で蓋が開くと、漏斗内の粒子がシート状に落下していく。落下用のスリットは発射管の中心線と一致するように設置されており、銃口から出た飛翔体は、ダストカーテンを横切るように進むことになる。別途実施した、側方からレー

ザースリット光を入射した実験により、飛翔体が進行中もダストの動きはほぼカーテンの内面にあり、顕著な三次元構造はできないことが確認されている。ダストの挙動は、測定部の観測窓を通し、片方からカメラを、反対側から光を投入することで観察している。カメラは(株)ノビテックのPhantom Miro M310を使用した。

ダスト粒子は直径0.2mmと0.4mmの研磨用ガラスビーズである。ダスト粒子の落下速度は約3m/sと飛翔体速度に比べて十分遅く、その効果は無視できる。なお、0.4mmガラスビーズの場合、ダストカーテンの数密度は約 $5 \times 10^8 \text{m}^{-3}$ と見積られており[1]、気体分子運動論の剛体球モデルを用いると平均自由行程は約3mmとなり、クヌーセン数的には希薄気体流れに相当する。飛翔体は直径25.75mm、質量約4.3gのポリカーボネイト製中空球を使用した。外径が発射管内径と等しいため、サボなしでの発射が可能であり、分離後のサボが後方からダストカーテンに衝突して現象を乱すことがない。測定部はあらかじめ約35Paまで減圧して行われた。しかし、残存大気の影響は無視できず、今後、真空排気系の強化が必要である。

3. 可視化結果とその考察

図2に代表的な可視化画像を示す。球の飛行速度は画像解析から約430m/sと見積られる。カメラの解像度は 512×256 で、撮影速度は20,000fps、露光時間は $1 \mu\text{s}$ である。図に示す2枚のスナップショット（ $150 \mu\text{s}$ 時間差）から以下のことがわかる。

- ・飛翔体通過前のダストカーテンには濃淡のパターンがあり、クラスター構造が見られる。

- この構造は、球がカーテン中を進行してもその前方で見ることができる。
 - このことは、球の進行が作る擾乱がカーテン中を伝播する速度は有限であることを示している。
 - このケースでは、球の飛行速度が擾乱の伝播速度を上回り、超音速状態になっていると思われる。
 - 球周りに弓状に周囲とは光の散乱状況が異なる領域が存在し、球の進行とともに移動している。
 - この部分は入射光を強く散乱させており、微粒子が高密度で存在していることを示唆している。
 - 球表面近傍では噴出ジェット状のパターンが見られており、ガラスビーズが球表面に衝突して粉碎されて微粒子になっていると予想される。
 - 弓状の明領域の球表面側に暗領域が存在する。暗領域には、1)光を散乱する粒子が存在しない、2)後方からの入射光を通さないほどの高濃度のダスト領域が存在する、と考えられる。別途実施したカメラと同一方向からの光入射で得られた画像との比較から、図2の暗領域はダスト領域のシルエットであり、2)の方の可能性が高いと考えられる。
 - 物体後方のウェイク領域では背景の粒子以外、ダストの存在が観測されない。このことは、球前方からのまわり込み、すなわち、通常の圧縮性気流で起こる膨張流れが存在しないことを意味する。
- このように、ダスト粒子群の振る舞いは、通常の圧縮性流体に似ている部分と、異なる性質を持つところがある。非膨張性については、筆者らが開発している「圧縮するが膨張しない(CNE)流体」モデル[2]が適用できるのではないかと考えている。

図2の場合、ダスト粒子同士、ダストと飛翔体表面の二種類の異なる衝突が関与し、現象を複雑にしている。そこで、後者を排除するため、ダスト雲のジェットをダストカーテンに突入させる実験を行った。このときは、サボを使用し、サボに開けた穴にダスト粒子を入れて発射し、出口に設けたサボ分離板によってダスト雲のみをジェットとして射出している。図3は、その結果例である。ダスト雲は約170m/sでダストカーテンに衝突しているが、250 μ s後の画像では、その存在がぼやけている。このことは、流体における粘性のような散逸現象が存在することを示している。

4. まとめ

パリスティックレンジを用いてダストカーテンを物体が横切る際の様子を観察した。飛翔体前方の衝撃波に似た構造の形成、ウェイク側への膨張やまわり込みの欠如などの特徴が確認できた。今後、パラメータを変えて各種実験を行い、これらを表現し得る流体力学的モデルを構築していく予定である。

謝辞: 本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(B) No. 16H04585)の支援を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Masaki, C., et al., 31 ISTS, Matsuyama, 2017-e-48-s, 2017. [2] Suzuki, K., 31st ISTS, Matsuyama, 2017-k-47, 2017. (to be published in Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan)

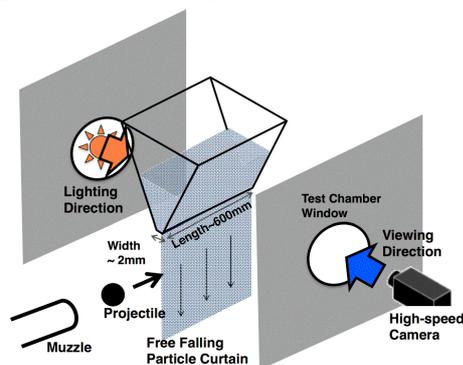


図1 ダストカーテン生成機構

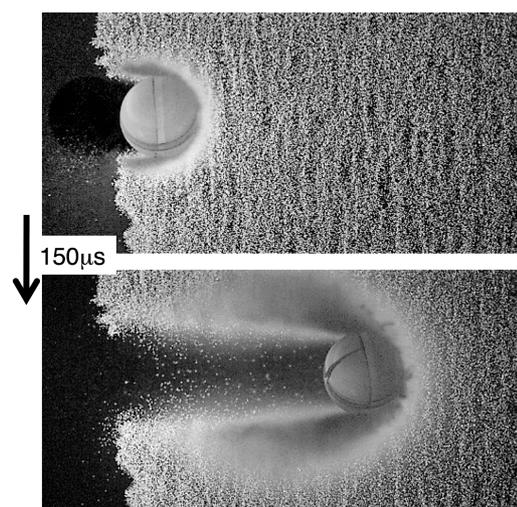


図2 ダストカーテンを進行する球の画像

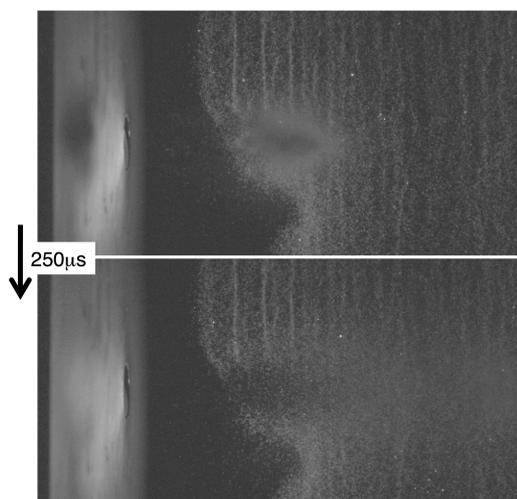


図3 ダスト雲とダストカーテンの衝突