107 平板に衝突する微粒子の跳ね返り軌跡

金 丙文^o (九州大学), 荒巻 森一朗 (九州大学)

Rebound Trajectory of Impinging Particle on a Flat Plate

Byung-Moon KIM and Shinichiro ARAMAKI

Institute of Advanced Material Study, Kyushu University

ABSTRACT

A detailed experiment investigation of rebound trajectory of impinging particle on a flat plate was carried out using Ar⁺ laser and a camera. The jet velocity was 6.9 m/s and 15 m/s, and three kinds of glass beads of 30, 58 and 100 μm in diameter were used. The photographs of particle motion trajectory show that the impingement and the rebound depend on the momentum of particle: and the second-impingement depends on the particle diameter and the entrainment velocity of environment air. The particle motion near the plate shows a rounded trajectory in radial direction by air flow along the wall.

Key Words: Flow Visualization, Impingement, Particle, Rebound, Trajectory

1. 緒言

微粒子の衝突は微粒子の流量および粒径選択が容易であり、高い熱伝達率が得られるため、広い範囲の工業分野に利用されている。より効率的に応用するため、流体力学および熱工学的分野では微粒子の流動⁽¹⁾⁽²⁾および粒子衝突による熱伝達増加のメカニズム⁽³⁾⁽⁴⁾などについて様々な研究がなされている。しかし、それらを究明するためには微粒子の挙動に関する正確な情報が必要であるが、いままでのところこれらは予測の段階に留まっている。

本研究はそのような観点から、ノズル出口の気体速度 u_j (6.9m/s、15m/s)を変化させ、異径微粒子 ($d_p=30, 58, 100 \mu\text{m}$) を平板に衝突させる実験を行い、微粒子運動の軌跡を可視化撮影し、得られた画像から跳ね返り高さを求め

た。さらに、エントレイメント速度が微粒子におよぼす影響について調べた。

2. 実験装置および方法

衝突微粒子の軌跡可視化システムの概略図をFig. 1に示す。ノズル出口の気体の流れに、球形率95%、密度2500 kg/m³の3種類のガラスビーズ ($d_p=30, 58, 100 \mu\text{m}$) をそれぞれ投入して、ノズルから垂直に100mm離れた平板に衝突させ、微粒子軌跡の可視化実験をデジタルカメラおよびAr⁺レーザを用いて行った。Ar⁺レーザ (Ion Laser Technology, 5500A) は波長457~514.5nm、ビーム直径 ($1/e^2$) は0.8mm、円筒レンズを通過した直後のレーザシート光の広がり角度は6degである。測定部のシート光

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

は円形噴流の中心軸を通るように照射し、シート光の厚さは跳ね返り微粒子の軌跡を撮影するために適当な3mmを選択した。微粒子の軌跡撮影はデジタルカメラ (Minolta、RD-175) を用いた。このカメラは3枚の CCD の画素信号を重ね合わせる方式を用いており、175万画素相当 (水平1528画素×垂直1146画素) の画像を得ることができ、撮影した画像はパーソナルコンピュータに転送し、画像処理ソフト Adobe PhotoShop でモノクロ画像に変換し、編集した。微粒子の軌跡撮影におけるデジタルカメラのシャッター速度は1/2s、絞りは6.7である。

衝突噴流軸中心と衝突板との交点を基準として、鉛直ノズル方向を x 、半径方向を r と定義する。なお、本実験に使用したガラスビーズのノズル出口における最大速度を Table 1 に示す。これは PIV 計測の実験から得られた値である。

Table 1 The initial velocities at nozzle exit

$d_p (\mu\text{m})$	30	58	100
$u_p (\text{m/s})$	5.88	5.16	4.50
	12.36	10.03	8.79

撮影画像における微粒子の濃度が画像処理に最適となる様に微粒子の粒径および噴流速度に応じて粒子ローディング比 (粒子質量流量/気体質量流量) を Table 2 のように調節した。

Table 2 Loading ratio (particle mass flow/ air mass flow)

$u_j (\text{m/s})$	30 μm	58 μm	100 μm
6.9	0.62%	0.72%	0.97%
15	0.27%	0.32%	0.47%

3 .

3.1衝突微粒子の軌跡可視化 ノズル出口の気体速度 $u_j=6.9, 15\text{m/s}$ 、粒径 $d_p=30, 58, 100 \mu\text{m}$ の粒子軌跡を Fig. 2 および Fig. 3 に示す。

Fig. 2の $u_j=6.9\text{m/s}$ における跳ね返り微粒子の運動軌跡では、30 μm 微粒子は跳ね返り高さが壁面噴流領域内⁽⁶⁾に存在するため r 方向の気体流れの影響を受けて跳ね返り角度が大きい放物線運動をしている。58 μm 微粒子は周囲流のエントレインメント速度によりノズル軸方向に引き込まれるような放物線運動になる。しかし衝突噴流領域をはるかに越えてエントレインメント速度の影響を受けない領域に達する微粒子は、跳ね返り高さが最大に到達した後、平板に向かってほぼ垂直落下することが観察された。100 μm 微粒子は運動量が大きいため、気体のエントレインメント速度の影響を受けずほぼ垂直に平板と衝突する。跳ね返り高さが最大になる領域での 30、58 μm 微粒子の軌跡は緩やかな放物線を描き、100 μm 微粒子の軌跡は鋭い放物線を描いている。これらの違いはノズル軸中心に対する微粒子の跳ね返り角度およびエントレインメント

Fig. 2 Photographs of particle trajectory impinging on the plate with different particle diameters, for $u_j=6.9 \text{ m/s}$

Fig. 3 Photographs of particle trajectory impinging on the plate with different particle diameters, for $u_j=15 \text{ m/s}$

速度が原因と考えられる。

Fig. 3の $u_j=15\text{m/s}$ におけるノズル出口の微粒子の広がり角度は $u_j=6.9\text{m/s}$ の場合より大きく現れる。これは、ノズル出口速度が大きいほど微粒子の持つ運動量が大きくなり、ノズル内壁との衝突が激しくなるため微粒子の r 方向への速度が大きくなるのが原因と考えられる。跳ね返り微粒子の運動軌跡について、 $30\mu\text{m}$ 微粒子はノズル出口から r 方向への速度成分を保って平板近傍に近づくため r 方向の気体流れの影響で平板に対する入射角度が広がる。その後、微粒子は緩やかな放物線運動をしながら平板に沿ってよどみ点を離れる。 $58\mu\text{m}$ 微粒子は周囲流のエントレインメント速度によりノズル軸中心に移動する軌跡を描いているが、 $u_j=6.9\text{m/s}$ における $58\mu\text{m}$ 微粒子よりもかなり小さい放物線運動をしている。 $100\mu\text{m}$ 微粒子はエントレインメント速度の影響が小さいので軌跡は緩やかな放物線を描いている。

衝突微粒子速度および粒径における微粒子の様々な運動軌跡の中で代表をFig. 4にスケッチで示す。跳ね返り微粒子の挙動は跳ね返り高さの違いによって大きく二つに分類される。一つは壁面噴流の影響を大きく受けて緩やかな放物線運動を行う微粒子と、もう一つは周囲流のエントレインメントの影響を受けて主流方向に押し戻される微粒子である。すなわち、 $u_j=6.9\text{m/s}$ の $30, 58\mu\text{m}$ 微粒子および $u_j=15\text{m/s}$ の $30\mu\text{m}$ 微粒子では前者の壁面噴流の影響を、 $u_j=6.9\text{m/s}$ の $100\mu\text{m}$ 微粒子および $u_j=15\text{m/s}$ の $58, 100\mu\text{m}$ 微粒子では後者の周囲流のエントレインメントの影響を受けて放物線運動をする。また、淀み点での微粒子は粒径および速度によらず r 方向の気体流れの影響により円弧の軌跡を描く。

Fig.4 Sketch for representative motion trajectories of impinging particle on a flat plate

Fig. 5はエントレインメント速度が微粒子の運動軌跡に及ぼす影響を調べるため、ノズル外壁から $30, 58, 100\mu\text{m}$ 微粒子を自由落下させた。気体のノズル出口速度は 15m/s

である。すべての微粒子の場合において、エントレインメント速度の影響を受けてノズル軸中心へ向かう軌跡が認められる。微粒子の粒径が小さいほどエントレインメント速度の影響が大きく表れ、ノズル軸中心軸に対する粒子軌跡の傾きが大きい。しかしFig. 2を見れば跳ね返った後平板へ向かう微粒子の軌跡は放物線を描いているが、Fig. 5はほぼ直線的な微粒子の軌跡が見られる。従って、微粒子の運動はエントレインメント速度の影響だけではなく微粒子のマグナス (Magnus) 効果による影響も受けていると考えられる。

Fig.5 Effect of entrainment velocity on particle motion trajectory with $u_j=15\text{m/s}$

3.2 跳ね返り高さ Fig. 6は跳ね返り高さおよびノズル軸 $r/d=0$ の計算結果を示す。計算には粒子運動方程式を用いて行った。ノズル軸 $r/d=0$ における高さ、および跳ね返り高さが最大になる半径位置 r_i と高さの関係を示している。跳ね返り高さ x_i および半径位置 r_i はノズル径 d で無次元化した。ノズル軸中心の微粒子の跳ね返り高さは主流の影響で跳ね返り高さが小さくなり、計算結果と良く一致している。また粒径が大きいほど跳ね返り高さは大きくなる。

跳ね返り高さが最大になる半径位置については、 $u_j=6.9\text{m/s}$ では粒径による差はほとんどない。しかし $u_j=15\text{m/s}$ では最大跳ね返り高さが高くなるに従い、その半径位置 r_i は噴流軸中心から離れていることがわかる。

4.

(1) 微粒子の一次衝突において、ノズル出口速度および粒径によらず平板まではほぼ垂直に衝突する。

(2) 微粒子の二次衝突において、粒径が小さい微粒子はエントレインメント速度の影響が大きく表れ、ノズル軸中心に対する入射角度が大きい放物線運動を描く。しかし粒径が大きい微粒子はエントレインメント速度による影響が若干見られるが、平板へ向かって緩やかな放物線運動を描く。

Fig.6 Maximum rebound height and rebound height at $r/d=0$

- 1) Hatta, N., Fujimoto, H., and Ishii, R., *ISIJ International*, Vol.31, No.4 (1991), 342
- 2) Anderson, A. L., and Longmire, E. K., *J.Fluid Mech.*, Vol.299 (1995), 333
- 3) Yoshida, H., Suenaga, K., and Echigo, R., *Int.J.Heat Mass Transfer*, Vol.33- 5 (1990), 859
- 4) Kurosaki, Y., Murasaki, T., Satoh, I., and Kashiwagi, T., *Heat Transfer*, Vol.5 (1986), 2587
- 5) 田中 敏雄, 川合 靖司, 田中 栄一, 井上 吉弘., *機論*, 56-524, B(1990), 965