

水平管内気液固三相流における粒子挙動に関する実験的研究

Study on Behavior of Particles in Gas-Liquid-Solid Three-Phase Flow
in a Horizontal Pipe

劉 双科* 高橋 弘**

by Shuangke LIU and Hiroshi TAKAHASHI

The behavior of particles in Gas-Liquid-Solid three-phase flow in a horizontal pipe was experimentally investigated. The behavior of particles was recorded with a high speed video camera and was analyzed with a X-Y coordinator. It was found that particles in a solid-liquid slug section were accelerated and transported. On the other hand, particles in a gas-liquid section remained at the same position. Lift-off angle of particles decreased with increasing the apparent mean velocity of solid-liquid mixtures. But, it increased with increasing the apparent air velocity.

Keywords: part stationary bed, gas-liquid-solid three-phase flow

1. はじめに

沈降性粗粒子の水力輸送システムを設計する場合、粒子を浮遊の状態に輸送するためには、かなりの輸送動力を必要とするため、一般的に、輸送速度は浮遊限界速度より小さい範囲において選定される。従って、管内を流動する粒子の大部分は管下部に集中し、管内の流れは、堆積層あるいは摺動層を伴った流れを示す。しかし、これらの流れにおいては、粒子による付加圧力損失が大きくなり、かつ管路閉塞に至る危険性も大きい。それゆえ、沈降性粗粒子を水力輸送する場合には、これらの危険性を回避し、かつ輸送を確実にを行うために、粒子群の流動による圧力損失あるいは管路閉塞の検討とともに、粒子群の管内の挙動も検討することが必要不可欠である。

粗粒子を含む高濃度スラリーを混気圧送するシステムを計画・設計する場合についても沈降性粗粒子スラリーの水力輸送の場合と同様であるが、著者らは既に気液固三相流における最小圧力損失が堆積速度により小さい流速範囲内に存在することを確認していることから、気液固三相流における輸送速度の選定は、固液二相流の場合と異なり、摺動流れより小さい範囲において選定されると思われる。従って、気液固三相流における流れは、局部堆積層をともなう流れを呈し、この流れにおける粒子の挙動の解明が必要となる。

さて、水平管路における粗粒子スラリーの粒子挙動に関する研究としては、管断面における濃度分布、粒子速度などを測定したもの²⁾³⁾あるいは粒子群の挙動の観点から堆積層および摺動層をともなう流れにおける粒子群の挙動を実験的かつ理論的⁴⁾⁵⁾⁶⁾に検討したものなどが見られるが、水平管内気液固三相流における粒子挙動については検討されていない。

よって、本研究は、粒子群の流動による圧力損失および管路閉塞の検討に先立ち、気液固三相流における粒子挙動を、粒子群の管内運動機構、移動速度および飛び出し角などの点から検討することを目的とする。

* 東北大学大学院工学研究科資源工学専攻 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

**正会員 工博 東北大学助教授 工学部資源工学科 (同上)

2. 実験装置, 実験方法および実験試料

2.1 実験装置ならびに実験試料

Fig. 1に本実験で用いた装置の概略を示した。供試管は透明アクリル樹脂製の円管で構成されており、内径は30mm、長さは7.5mである。空気注入孔は、直径20mmの単一孔であり、これより空気を供試管内に注入した。粒子群の挙動の観察はウォータージャケットを通して行った。円管路のレンズ効果による画像の歪を除去するためにウォータージャケットはアクリル板で作製し、内部を水で満たした。また、ウォータージャケットは空気注入孔から管径の約420倍の位置に設置し、助走区間を十分にとった。また、肉眼観察およびビデオ撮影を容易にするため、全粒子の2~3%の粒子を白色に着色し、トレーサー粒子とした。

実験に用いた粒子は、球等価直径が1.9mmおよび2.9mmの安山岩碎石2種類（比重 2.74）である。

2.2 実験方法

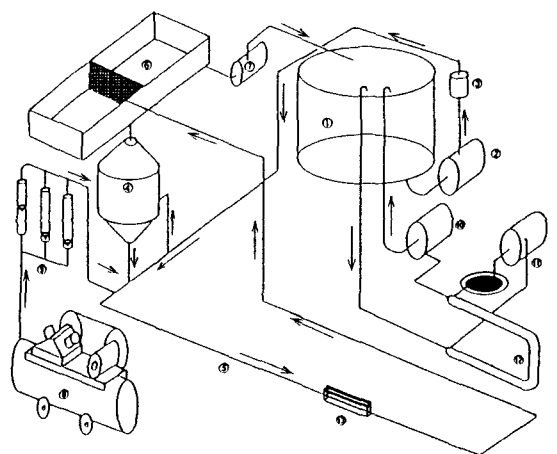
実験は初めに所定の空気量および粒子量になるようにロータメータのバルブおよび粒子供給装置のバルブを調節した後、固液混合体の流量を所定の値に設定する。管内の流れが安定した後、その状態における平均流速、吐出濃度などの測定を行い、同時に写真あるいはビデオ撮影を行った。撮影スピードは200コマ/秒であり、撮影されたビデオ画像は、撮影に使用したNAC社製の高速ビデオシステムにて再生した。次に、NAC社製XYコーディネータを用いてトレーサー粒子の位置座標を検出し、粒子の移動速度などを算出した。

3. 粒子群の挙動の観察

実験に先立ち、三相流の流動様式における粒子群の挙動の肉眼観察および高速ビデオ撮影を行った。Fig. 2は水平管内気液固三相流の流動状態を撮影した写真から得られた模式図であり、流れ方向は左から右である。

① 固液混合体の流速が十分に大きい場合、Fig. 2(a)に示すように、管内に気泡流をとめない、ほとんどの粒子は摺動または浮遊状態にて輸送される。

② ①の状態から固液混合体の流速を減少



①Mixing Tank, ②Solids Pump, ③Electromagnetic Flowmeter, ④ Feeder, ⑤Test Section, ⑥Phase Separation Tank, ⑦Return Pump, ⑧Air Compressor, ⑨Rotameter, ⑩Mixing Pump, ⑪Cooling-Water Pump, ⑫Cooler, ⑬Water Jacket

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

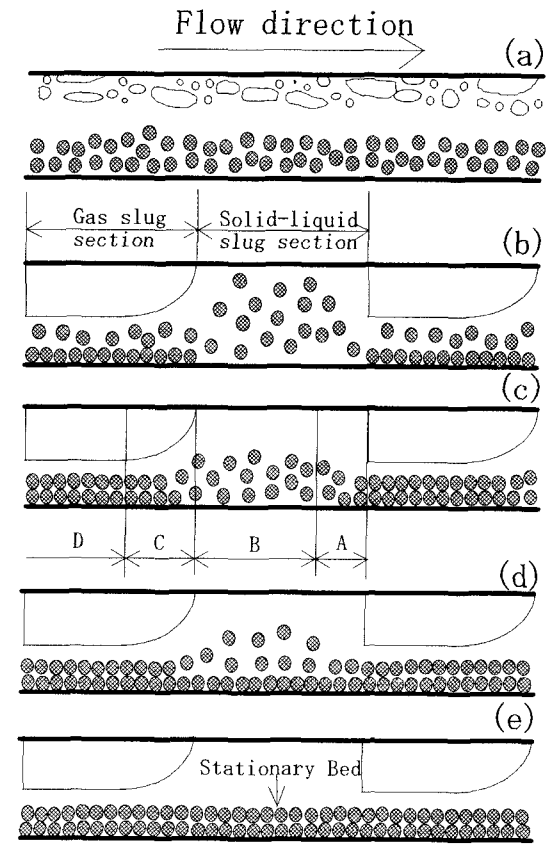


Fig.2 Schematic diagram of flow patterns of mixture with air

させると、気泡状のいくつかの空気が合体して、気体スラグを形成するようになる。一方、粒子が流体から受ける推力は徐々に減少するため、ある流速に達すると、Fig. 2(b)に示すように、気体スラグ部における固液相中の粒子群が管底に一時的に停止するが、すぐに動き出すと言った状態が観察される。

③さらに固液混合体の流速を低下させると、Fig. 2(c)に示すように、気体スラグが通過する間に気体スラグ部における固液相中の粒子群は管底に停止し、静止粒子層を形成する。一方、固液スラグ部における粒子群は摺動状態で移動する。

④さらに流速を低下させると、Fig. 2(d)に示すように、気体スラグ部に静止粒子層が形成されるとともに、固液スラグ部においても管底の粒子群が一時的に停止する状態が観察される。

⑤ ④の状態よりもさらに流速を低下させると、Fig. 2(e)に示すように、管底部全体に静止粒子層が形成される。

4. 実験結果および考察

4.1 粒子の挙動および移動速度

Fig. 3は粒径1.9mmの粒子を用いて、固液見かけ速度を0.4m/s、空気の見かけ速度（空気流量を管断面積で除した見かけの速度）を0とした場合、すなわち堆積層をとまう固液二相流における粒子群の挙動の軌跡を示したものであ

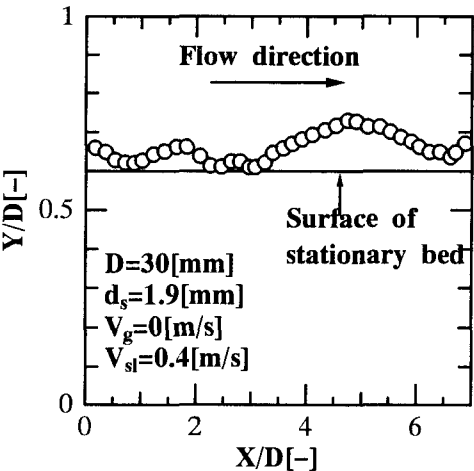


Fig.3 Particle trajectory in solid-liquid flows

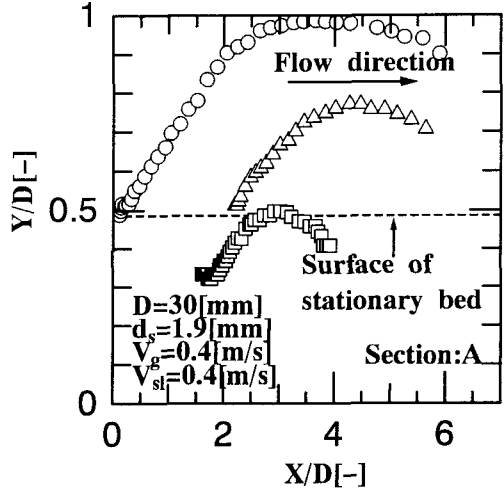


Fig.4 Particle trajectory in section A

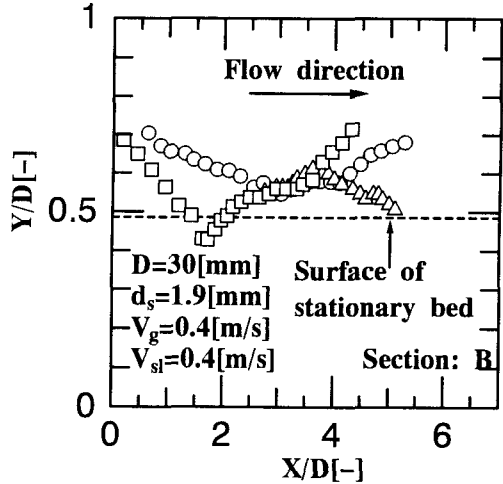


Fig.5 Particle trajectory in section B

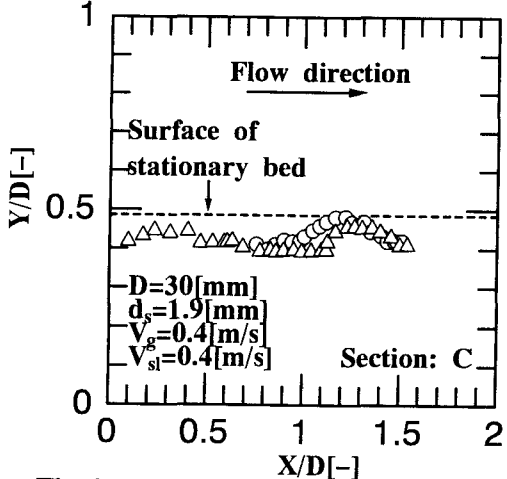


Fig.6 Particle trajectory in section C

る。なお、図中の実線は堆積層表面を表す。この図に示したように、跳躍運動に入る粒子が堆積層表面の粒子と反発して、次の跳躍に入り、以後同様な経過を繰り返して、跳躍しながら移動することが確かめられた。これは従来より報告されている結果⁴⁾⁷⁾と同様である。

局部堆積層をともなう気液固三相流れにおける粒子の挙動については、Fig. 2の模式図中に示したように、固液スラグ部から気体スラグ部までの流れの区間をA, B, C, Dの四つの区間に分けて考える。Fig. 4ないしFig. 7は粒径1.9mmの粒子を用いて、固液見かけ速度（電磁流量計で計測される固液流量を管断面積で除した見かけの速度）を0.4m/s、空気の見かけ速度を0.4m/sとした場合のそれぞれ区間における粒子の移動軌跡を示したものである。ただし、A, BおよびCの区間内においては、堆積層が存在しないが、比較のために、区間Dに見られる局部堆積層の高さを破線で示した。Fig. 8ないしFig. 11はFig. 4ないしFig. 7に示したそれぞれ場合における粒子の移動速度を示したものである。

さて、Fig. 4は流れ区間Aにおける粒子の移動軌跡を示したものであるが、図に示したように、気体スラグ部の通過の間は静止していた粒子群が固液スラグ先端で加速され、堆積層表面の粒子が急に管上部まで持ち上げ、粒子速度が急激に増加していること、また、堆積層中の粒子はある高さまで持ち上げられ、粒子速度はゆっくり増加することが分かる。これは都田ら⁸⁾が指摘しているように、気体スラグ部で静止した粒

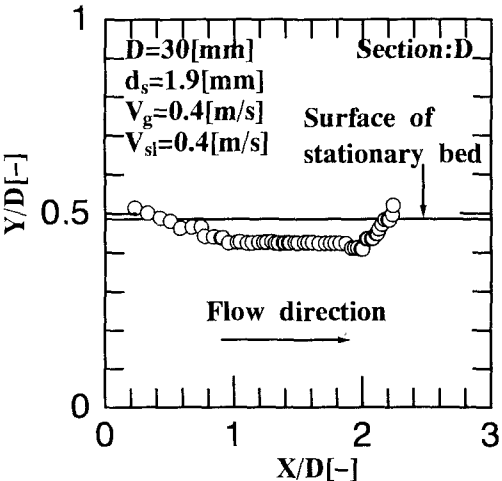


Fig.7 Particle trajectory in section D

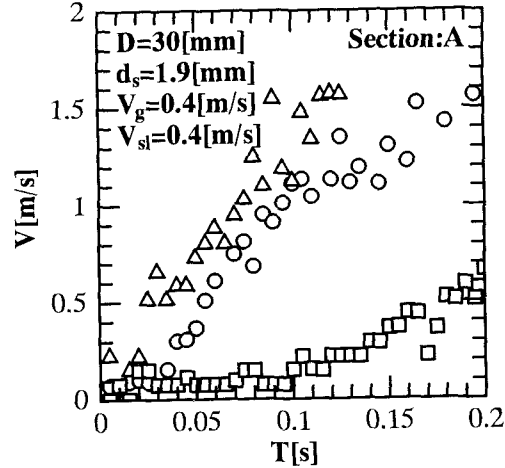


Fig.8 Particle velocity in section A

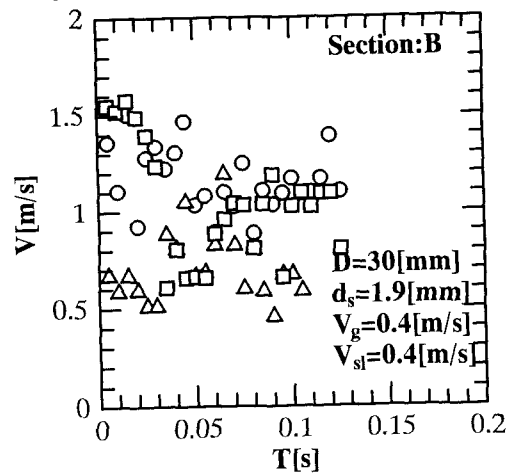


Fig.9 Particle velocity in section B

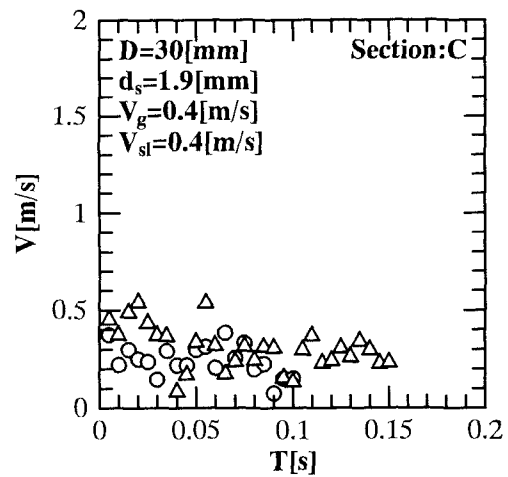


Fig.10 Particle velocity in section C

子が固液スラグ先端で発生した渦によって浮遊したためと考えられる。

Fig. 5は流れ区間Bにおける粒子の移動軌跡を示したものであるが、図に示したように、この区間における粒子の流動状態は、跳躍によるものが主であることが分かる。

Fig. 6は流れ区間Cにおける粒子の移動軌跡を示したものである。図に示したように、固液スラグが通過した後、粒子速度が減少し、再び堆積層に取り込まれることが分かる。

Fig. 7は流れ区間Dすなわち気体スラグ部における粒子の移動軌跡を示したものである。図に示したように、固液スラグの通過後、堆積層に取り込まれた粒子は、速度が0となり、堆積層を形成する。しかし、また、次の固液スラグが来ると同時に粒子群が再び加速され、持ち上げられ、下流方向へ移動することになる。

4.2 粒子群の飛び出し角

本実験範囲においては、4.1で示したように、流れ区間A、すなわち固液スラグ先端において、粒子群は加速され、ある最高点に達した後、ほぼ一定の高さを保ちながら浮遊することが確かめられた。本研究において、粒子群の飛び出し角を粒子が加速し始める点と最高点と結んだ線と水平方向との角度と定義し、その模式図をFig. 12に示した。Fig. 13は粒径が1.9mmであり、空気の見かけ速度が0.4m/sである場合の飛び出し角と固液見かけ速度との関係を示したものである。空気の見かけ速度が一定である

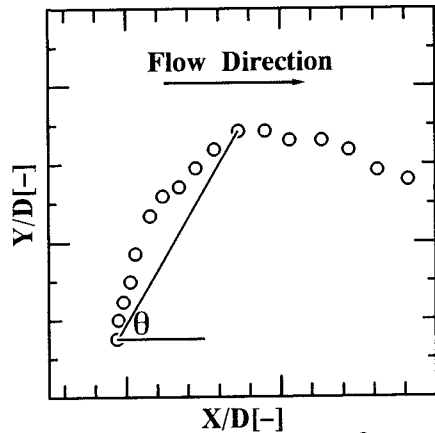


Fig.12 Schematic diagram of definition of lift-off angle

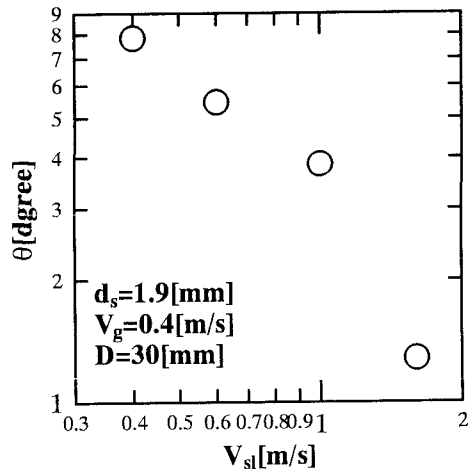


Fig.13 Relationship between θ and V_{sl}

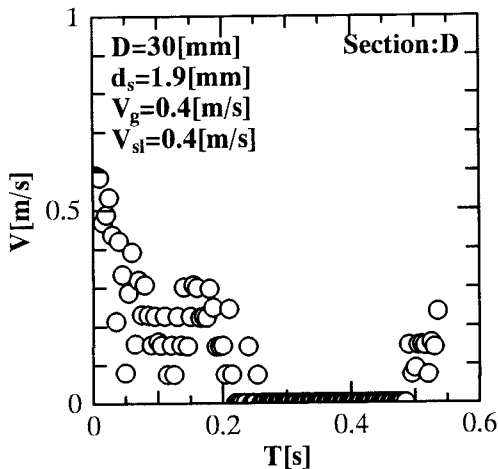


Fig.11 Particle velocity in section D

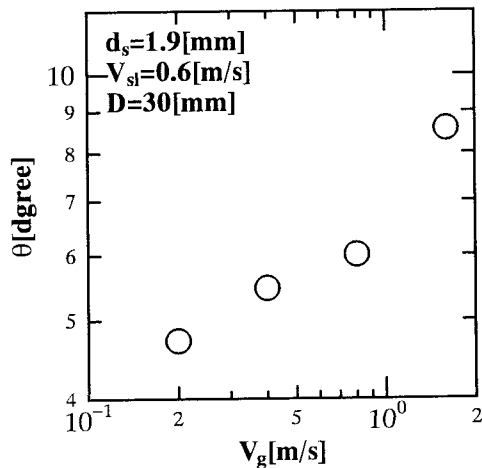


Fig.14 Relationship between θ and V_g

場合、固液見かけ速度の増加にともない、飛び出し角が小さくなる。これは固液見かけ速度の増加により粒子群の跳躍距離が増加し、全体の跳躍軌跡が平坦になることに対応している。

Fig. 14は粒径が1.9mmであり、固液見かけ速度が0.4m/sである場合の飛び出し角と空気の見かけ速度との関係を示したものである。固液見かけ速度が一定である場合、空気の見かけ速度の増加するにともない、飛び出し角は増加している。気体スラグ後部に発生する渦により粒子群が持ち上げられることは既に述べたが、この結果は、空気の見かけ速度の増加にともない、堆積層表面の粒子を流れの主流方向へ持ち上げる渦による力が増加するためと考えられる。

5. むすび

水平管内気液固三相流における粒子挙動に関して実験的に検討した結果、以下のことが明らかとなった。すなわち、局部堆積層をともなう気液固三相流れにおいて、気体スラグ部で静止した粒子は固液スラグ先端で加速され、固液スラグ中である距離だけ移動した後、固液スラグ後部から吐き出され、再び堆積層を形成する。管内において、このような固液スラグが次々と通過することによって粒子が運ばれるが、粒子が下流方向に輸送されるのは粒子が固液スラグ内に存在するときだけである。また、固液スラグ先端において、粒子群の飛び出し角が、空気の見かけ速度が一定の場合、固液見かけ速度の増加にともない飛び出し角が小さくなること、および固液見かけ速度が一定の場合、空気の見かけ速度の増加にともない飛び出し角が増加することが確かめられた。

参考文献

- 1)高橋 弘・劉 双科・益山 忠・松岡 功:資源・素材学会誌, Vol. 111, pp. 855-860(1995)
- 2)Durand, R. : Intern. Assoc. Res. 5th Congr. Minneapolis, pp. 89-103, (1953)
- 3)Newitt, D. M., Richardson, J. F., and Shook, C. A. : Inter. Chem. Engrs., pp. 88-100, (1961)
- 4)野田佳六・高橋 弘・川島俊夫:日鉱誌, 100[1158], pp. 657-662, (1984)
- 5)野田佳六・高橋 弘・川島俊夫:日鉱誌, 101[1167], pp. 295-301, (1985)
- 6)高橋 弘・野田佳六・川島俊夫:日鉱誌, 101[1173], pp. 713-717, (1985)
- 7)椿 東一郎:水理学Ⅱ, pp. 230, (1974)森北出版
- 8)都田昌之・島崎孝二・前田四郎:化学工学論文集, 第4巻, 第1号, pp. 56-82, (1978)