

半円筒形ドラフトチューブ付き噴流層における 粒子とガス流の挙動に関する研究

幡手泰雄・上村芳三・中礼誠也・宮内正彦・竹下浩
伊地知和也・田中安彦
(受理 平成3年5月31日)

SOLIDS AND GAS FLOW BEHAVIOR IN A SEMI-CYLINDRICAL DRAFT TUBE-SPOUTED BED

Yasuo HATATE, Yoshimitsu UEMURA, Seiya CHUREI, Masahiko MIYAUCHI,
Hiroshi TAKESHITA, Kazuya IJICHI and Yasuhiko TANAKA

A semi-cylindrical spouted bed (0.099 m I.D.) with a semi-cylindrical draft tube (0.021 m I.D.) was employed to obtain fundamental data for the design of a spouted bed coal gasifier. Air was used as the carrier gas. Three kinds of glass particles were used as the circulating medium. The effects of gas feed rate, tube-cone clearance, cone angle, particle diameter, and particles loading on the behavior of the semi-cylindrical spouted bed were investigated. The gas velocity in draft tube only depended on the gas feed rate. The gas velocity in the annulus increased with increasing the tube-cone clearance, with increasing the cone angle, with increasing particle diameter, and with decreasing the particles loading. The solids circulation rate increased with increasing the tube-cone clearance. Correlations to describe the annulus gas velocity and solids circulation rate were proposed.

緒 言

装置の中心部にドラフトチューブを設けた、いわゆるドラフトチューブ付き噴流層は、通常の流動層や噴流層に比べて比較的安定な流動状態を得られ、様々な操作条件及びその許容範囲が広いことに特徴がある。

1973年の石油ショック以来、エネルギー源の多用化が進んでいく中で、本研究室では石炭の有効利用を考える上で最近注目されてきた、石炭ガス化装置へのドラフトチューブ付き噴流層の、応用の可能性について検討してきた。^{1,2)}まず、ドラフトチューブ付き噴流層の、透明アクリル樹脂製のコールドモデル装置を用いて、様々な基礎研究を行ってきた。即ち、各種操作因子が、粒子循環量 (W_s)、アニュラス部内ガス流速 (U_A)、ドラフトチューブ内ガス流速 (U_D) に及ぼす影響を、実験的に検討し、装置特性として、入口ノズルからドラフトチューブ下端までの距離 (以下

チューブ間距離と略す)、及び円錐部角度、充填粒子特性として粒子径、粒子充填量を選び検討を行ってきた。また、今回は、ドラフトチューブ入口付近及びアニュラス底部における粒子の流動特性に付いての知見を得るために半円筒のコールドモデル装置を用いて高速度カメラによる観察を行った。また各操作因子が、 W_s 、 U_A 、 U_D に及ぼす影響についても測定を行った。

2. 実 験

2.1 試料

本研究において使用した固体粒子は、球形ガラス粒子である。Table 1 に、その物性を示す。粒子径 dp は写真撮影法による3乗2乗平均径である。粒子終末速度は、単一球形粒子に対する静止流体中での粒子終末速度 (式 (1) より算出) である。最小流動化速度は、実際に圧力損失の測定を行って求めた。その図を Fig. 1 に示す。

Table 1 固体粒子の物性

| 粒子種類 | d_p [μm] | ρ_p [kg/m^3] | u_t [m/s] | u_{mf} [m/s] |
|------|----------------------------|--|----------------------------------|-------------------------------------|
| ガラス | 277 | 2.54×10^3 | 2.26 | 0.054 |
| | 877 | | 7.17 | 0.460 |
| | 1544 | | 10.19 | 0.670 |

$$u_t = \begin{cases} \frac{g(\rho_p - \rho_f) d_p^2}{18\mu} & \text{Re}_t \leq 5.76 \text{ or } \text{Ar} \geq 104 \\ d_p \left[\frac{4g^2(\rho_p - \rho_f)^2}{225\rho_f\mu} \right]^{1/3} & 5.76 < \text{Re}_t \leq 517 \text{ or } 104 < \text{Ar} \leq 9.43 \times 10^4 \\ \frac{3g(\rho_p - \rho_f) d_p^{1/2}}{\rho_f} & 517 < \text{Re}_t \leq 10^5 \text{ or } 9.43 \times 10^4 < \text{Ar} < 3 \times 10^9 \end{cases} \quad (1)$$

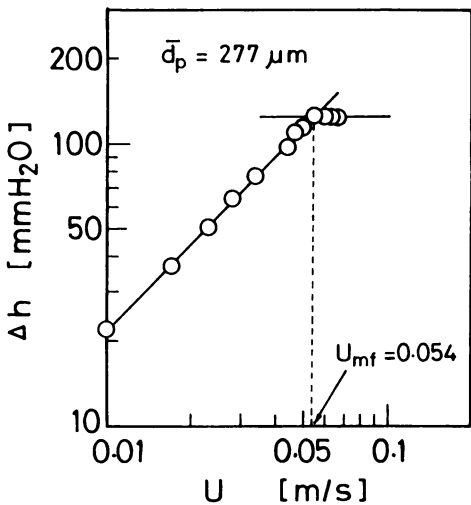


Fig. 1 最小流動化速度の測定結果

Fig. 1 に示すように、流速を上げて行くにしたがって、圧力損失は、上昇していく。この時、層は固定層である。しかし、流速がある値以上に上がると、圧力損失が上昇しなくなる。これは流速が増加することによる抵抗増大と、空隙率が増加することによる抵抗減少が相殺され、圧力損失がほとんど変わらないためである。圧力損失が一定となり始める流速のことを最小流動化速度 (u_{mf}) と呼ぶ。

2. 2 実験装置

Fig. 2 に、本研究で使用した半円筒コールドモデル実験装置の概略を示す。流動媒体としてのガスは室

温の空気を用い、コンプレッサーからエア・フィルター、エア・オイルセパレーター及び流量制御部(オリフィスマーターとニードル・バルブ)を経由し、塔底より供給される。

塔本体は、外径120mm、内径99mmの外側チューブ(半円筒)と、外径27mm、内径21mmのドラフトチューブ(半円筒)から成っている。外側チューブ、ドラフトチューブ共に材質は、透明アクリル樹脂製である。そして、塔底に円錐部角度が $\pi/3$ rad (他に $5\pi/18$, $7\pi/18$ rad及び π radの物があり、交換可能)である円錐部が、取り付けられている。また、ガス入口ノズルと円錐部の間には、充填粒子の支持のために400メッシュの金網が、挟み込まれている。アニュラス上部は開放にしてあり、その上に斜め仕切り板を設けて、ドラフトチューブから噴出した粒子は、切り替え器を操作することで、塔内へ、あるいはサンプラーへと切り替えられ、粒子の循環量を測定できるようになっている。また、アニュラス部のガス流速は、円錐部の上部

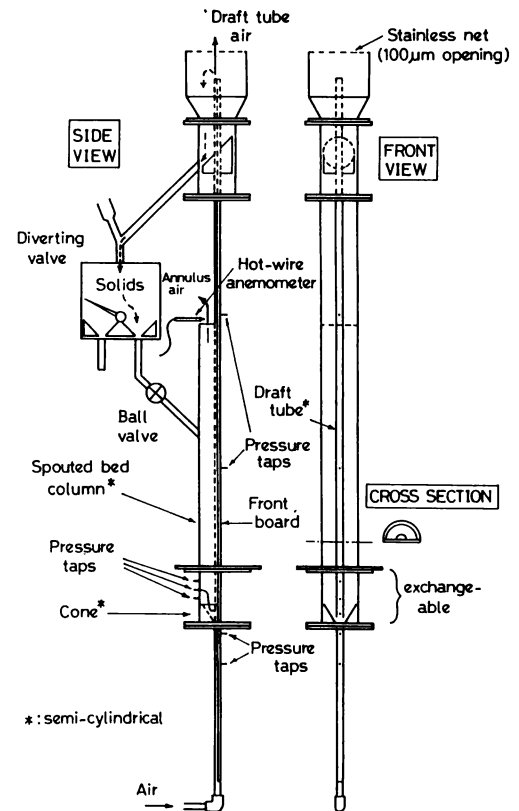


Fig. 2 実験装置図

側面に設けられた2箇所ノのタップ間の圧力損失を測定する事によって求めた。しかし、流速がかなり上昇すると層内が流動化してしまうために圧力損失は、それ以上上昇しなくなり正確なアニュラス部内ガス速の測定が困難となる。そこで、アニュラス上部の開放部分に熱線風速計を設けて測定を行った。

2.3 実験操作

アニュラス開放部より塔内に粒子を所定量充填した後、流量調整弁を開いてコンプレッサーから空気を送り込み、調整弁を操作して、所定のガス速になるように空気を供給して粒子を噴流させ、循環させた。粒子の循環が安定したところ（全粒子が装置内を1回以上循環した後）で、切り替え器をサンプラー側へ切り替え、一定量のサンプリングをしてその経過時間を計り粒子循環量を測定した。同時に、円錐部の上部側面に設けられた2箇所ノのタップ間の圧力損失を、マンメータで測定し、Fig. 3に示す検量線を用いて、式(2)を導出し、アニュラス部のガス流速を求め、下の式(3)よりドラフトチューブ内のガス流速を算出した。また、熱線風速計によるアニュラス部内ガス流速の測定は、Fig. 4に示すような検量線を用いて行った。圧力損失及び熱線風速計によるアニュラス部内ガス流速の測定で用いる検量線は、各操作因子が変わる事に作成した。

$$U_A = 10^{((\log(\Delta P/L) - A)/B)} \quad (2)$$

* A, Bは各操作因子それぞれについて決まる定数である。

$$U_D = ((Q_T - Q_A)/S_D) \times 10^{-2} \quad (3)$$

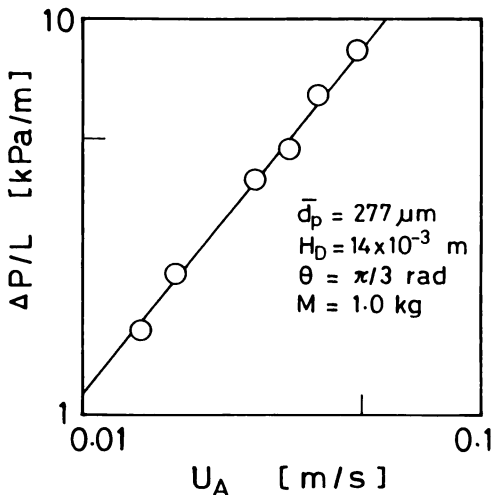


Fig. 3 アニュラス部圧力損失検量線

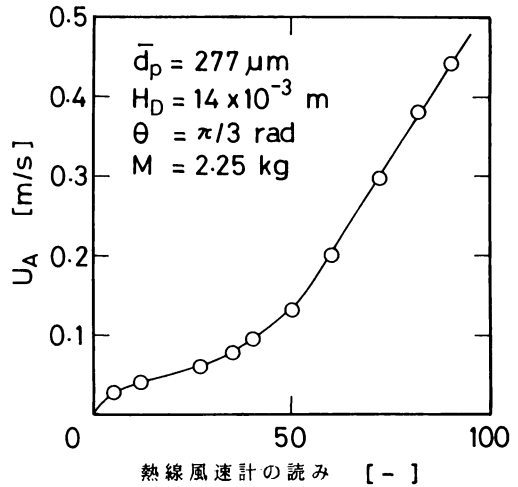


Fig. 4 熱線風速計検量線

2.4 実験条件

Table 2に本研究での実験条件を示す。ここで空塔ガス速度 (U) は、供給ガス流量をアニュラス面積とドラフトチューブ面積との和で乗じたものである。

Table 2 実験条件

| 粒子種類 | ガラスビーズ |
|----------------------|---|
| 粒子径 d_p [μ m] | 277, 877 and 1544 |
| 粒子充填量 M [kg] | 1.0 and 2.25 |
| 空塔ガス速度 U [m/s] | 0.1~1.3 |
| チューブ間距離 H_D [m] | 3×10^{-3} , 14×10^{-3} and 2.5×10^{-3} |
| 円錐部角度 θ [rad] | $5\pi/18$, $\pi/3$, $7\pi/18$, and π |

3. 実験結果及び考察

3.1 チューブ間距離の影響

Fig. 5からFig. 10に、粒子径277 μ m、円錐部角度60度としチューブ間距離 H_D を3, 14, 25mmの三種類に変化させた時の、 U_A , U_D vs. U及び W_s vs. Uの実験結果を示す。ここで、Table 3にキー・テーブルを示す。

U_A のUに対する傾向は、チューブ間距離を変えても変化しなかった。即ち、空塔ガス速度Uの増加に伴い、最初僅かに減少し、その後徐々に増加していった。これは、最初ドラフトチューブ内のガス速が、アニュラスから供給される粒子を運び去るのに十分でないた

めにドラフトチューブ内に粒子が停滞しホールドアップが増加し圧力損失も増加する。そのために、ノズルから供給されたガスは圧力損失の高いドラフトチューブよりもアニュラス側に抜け易くなっているために、 U_A は大きく、次第にドラフトチューブ内のガス速が大きくなるにしたがいホールドアップが減少して、 U_A も減少する。

U_D は、チューブ間距離の影響をほとんど受けなかった。これは、ドラフトチューブ内の断面積が、アニュラス部内のそれに比べて、非常に小さくガス速として考えると逆に U_D は、 U_A とは比較できないほど大きいために U_A に現れるほどのチューブ間距離の影響は受けないためであると考えられる。

W_s は、チューブ間距離が長くなるに伴い増加していった。これは、 H_D を大きくしていくと、ノズルから吹き込まれるガスとアニュラスから供給される粒子との接触面積が大きくなりドラフトチューブ内へ粒子がより多く入り込むためであると考えられる。

Table 3 キー・テーブル

| M [kg] | U_A | U_D | W_s |
|--------|-------|-------|-------|
| 2.25 | ○ | ● | ○ |
| 1.0 | □ | ■ | □ |

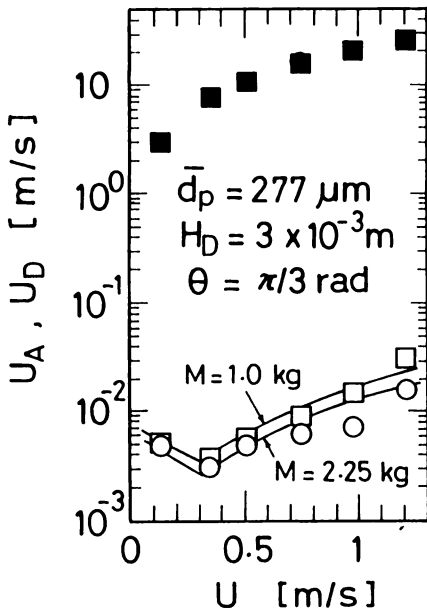


Fig. 5 U_A, U_D vs. U
($d_p=277\mu\text{m}$, $H_D=3\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta = \pi/3\text{rad}$)

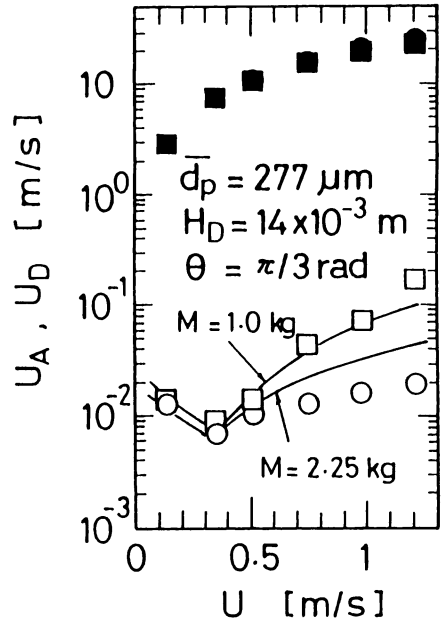


Fig. 6 U_A, U_D vs. U
($d_p=277\mu\text{m}$, $H_D=14\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta = \pi/3\text{rad}$)

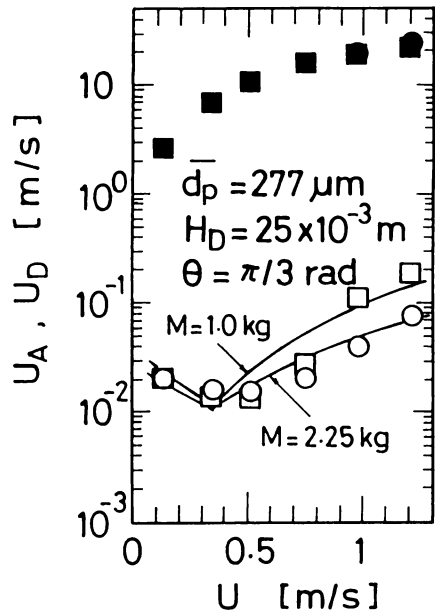


Fig. 7 U_A, U_D vs. U
($d_p=277\mu\text{m}$, $H_D=25\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta = \pi/3\text{rad}$)

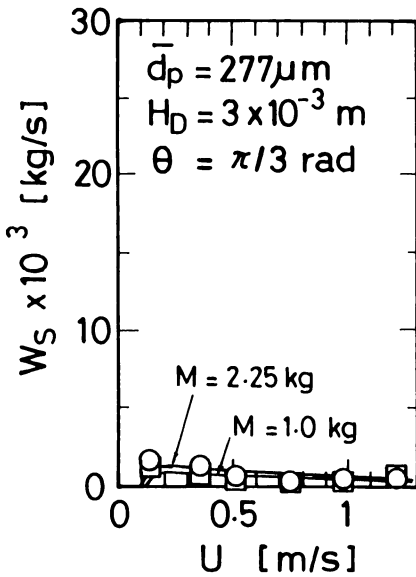


Fig. 8 W_s vs. U
($d_p=277\mu\text{m}$, $H_D=3\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta = \pi/3\text{rad}$)

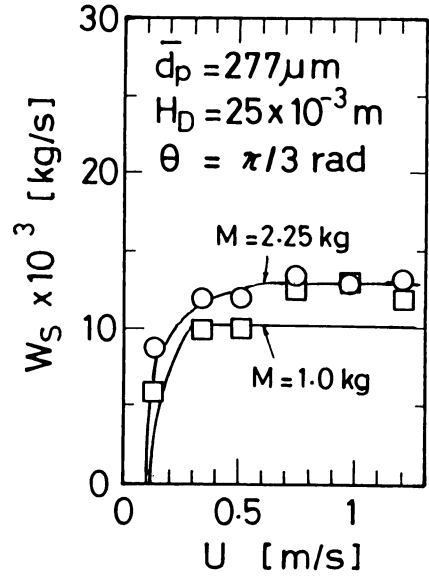


Fig. 10 W_s vs. U
($d_p=277\mu\text{m}$, $H_D=25\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta = \pi/3\text{rad}$)

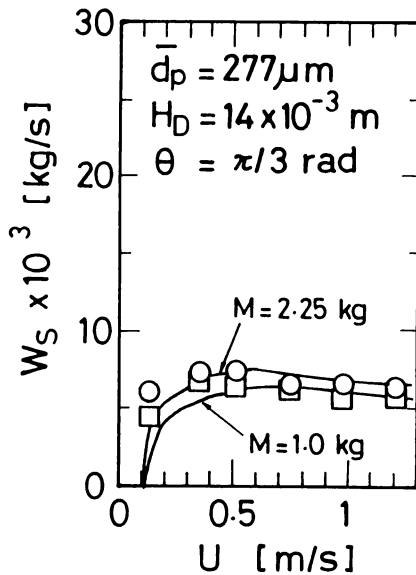


Fig. 9 W_s vs. U
($d_p=277\mu\text{m}$, $H_D=14\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta = \pi/3\text{rad}$)

3. 2 円錐部角度の影響

Fig.11からFig.16に、円錐部角度 θ を $5\pi/18$, $7\pi/18$, π radに変化させた場合の、 U_A , U_D vs. U 及び W_s vs. U の実験結果を示す。ここで、粒子径は $277\mu\text{m}$ 、チューブ間距離 H_D を 14mm の一定値とした。

円錐部角度を大きくして行くと、 U_A の値は全体的に増加していく傾向を示した。これは、角度が広がる、チューブ間距離は同じでも実際に粒子及びガスが通過する流路の断面積としては、広くなるために供給ガスがアニュラス部の方へ入り易くなるためであろうと考えられる。

W_s については、円錐部角度が、 50 , 60 度の場合と 70 , 180 度の場合とで、空塔ガス速度 (U) に対する傾向が異なることが確認できた。まず 50 , 60 度の場合は、 U に対して、最初増加した後に減少する傾向を示した。しかし 70 , 180 度では最初急激に増加した後、ややゆっくりと上昇する傾向を示した。これは、 50 , 60 度の場合はアニュラス部内において、粒子がブリッジを作り噴流が周期的になるために、粒子循環量が減少して行くのに対して、 70 , 180 度の場合には、このブリッジが生じないか、生じたとしても比較的小さなものであり、噴流の周期も短いために粒子循環量の減少は生じないものと思われる。このブリッジの生じる要因とし

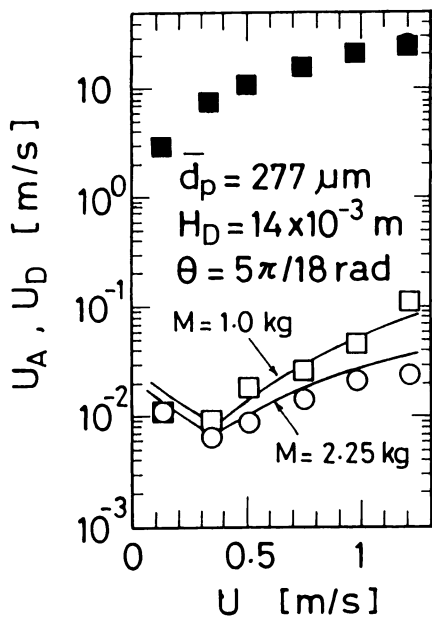


Fig. 11 U_A, U_D vs. U
 ($d_p=277\mu\text{m}$, $H_D=14\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta=5\pi/18\text{rad}$)

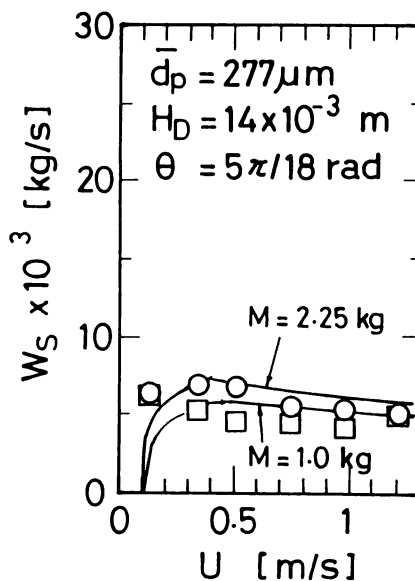


Fig. 12 W_s vs. U
 ($d_p=277\mu\text{m}$, $H_D=14\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta=5\pi/18\text{rad}$)

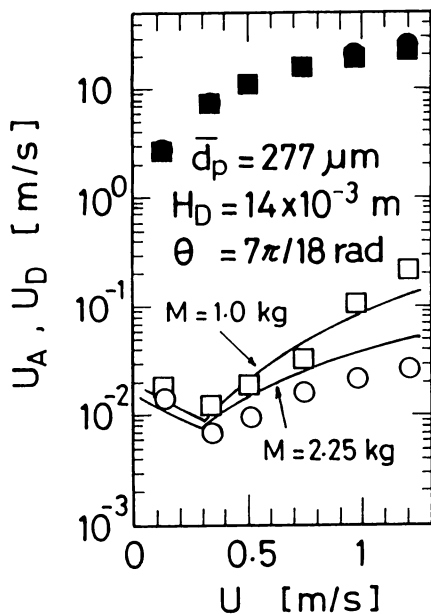


Fig. 13 U_A, U_D vs. U
 ($d_p=277\mu\text{m}$, $H_D=14\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta=7\pi/18\text{rad}$)

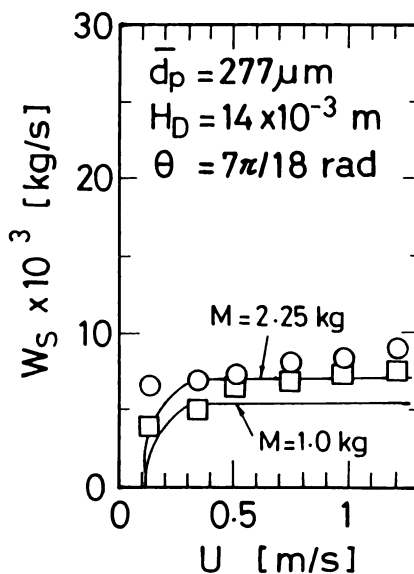


Fig. 14 W_s vs. U
 ($d_p=277\mu\text{m}$, $H_D=14\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta=7\pi/18\text{rad}$)

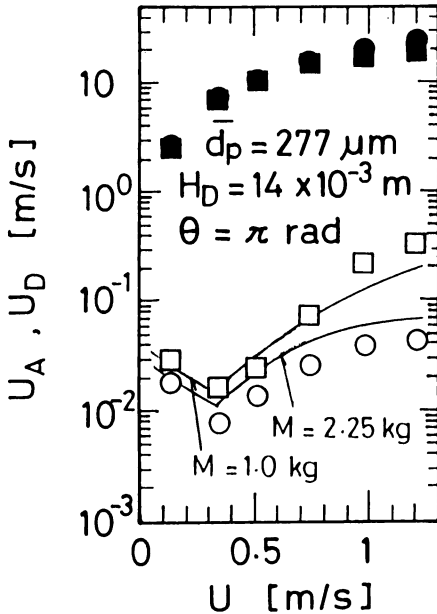


Fig. 15 U_A, U_D vs. U
($d_p=277\mu\text{m}$, $H_D=14\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta = \pi$ rad)

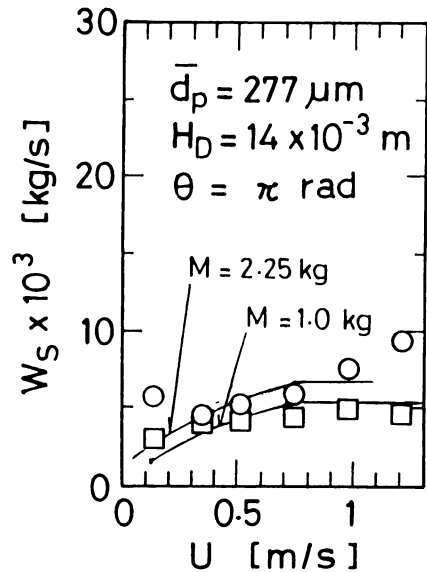


Fig. 16 W_s vs. U
($d_p=277\mu\text{m}$, $H_D=14\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta = \pi$ rad)

ては、以下の三点が挙げられる。^{3,4)}

- ① 圧力のバランスでつくられるクサビ型ブリッジ
- ② 静電気による付着ブリッジ
- ③ 空気圧のバランスによってつくられる圧バランスブリッジ

①は、粒径分布が広い場合に起こるもので、かなり強固なブリッジを作る。②は、粒径が小さいほど起こり易い。③は、ガス速が大きくなって層内にある粒子すべてを支えるのに十分な圧力に達したときに生じる。この中で、最も影響が大きいのは、静電気によるものと考えられる。

3. 3 粒子径の影響

Fig.17からFig.20に、粒子径を877及び1544 μm に変化させた場合の、 U_A, U_D vs. U 及び W_s vs. U の実験結果を示す。ここで、チューブ間距離 $H_D=14\text{mm}$ 、円錐部角度 θ は $\pi/3$ radで一定とした。

U_A は、粒子径が大きくなるにつれて増加した。これは、粒子径が大きくなると圧力損失が減少するためにアニュラス側にガスが流れ易くなるために増加したと思われる。

W_s は、粒子径が増加するにつれて大きくなった。

これは、粒子径が277 μm の場合は、静電気によるブリッジが生じることによって粒子循環量が全体的に減少しているのに対して877及び1544 μm の場合には、粒子径が大きいため静電気によるブリッジが生じないために、粒子循環量も増加したと思われる。

3. 4 粒子充填量の影響

以上の全ての実験において、粒子充填量を変化させて実験を行った。その結果は、これまでの図に示したとおりである。

U_A は、粒子充填量が増加するにつれて、減少していった。これは、粒子充填量が増えることでアニュラス部内の圧力損失が上昇し、供給ガスが、アニュラス部へ抜け難くなるためであると思われる。

W_s は、粒子充填量が増加するにつれて、増加していった。これは粒子充填量が増加すると粒子の静圧頭が増加するために、粒子がドラフトチューブ内に入り易くなるためである。

3. 5 高速ビデオカメラによる観察

アニュラス部内における粒子の挙動についての知見を得るために高速ビデオカメラによる観察を行った結果についてFig.21から26に写真で示す。

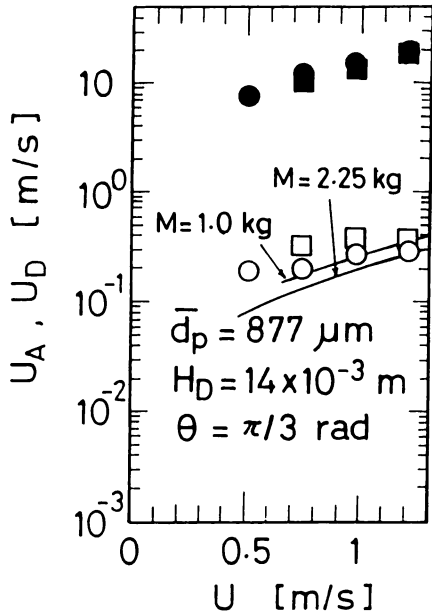


Fig. 17 U_A, U_D vs. U
 ($d_p=877\mu\text{m}$, $H_D=14\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta = \pi/3\text{rad}$)

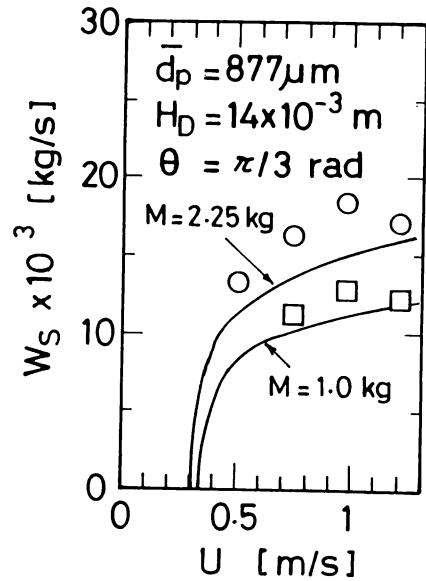


Fig. 18 W_s vs. U
 ($d_p=877\mu\text{m}$, $H_D=14\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta = \pi/3\text{rad}$)

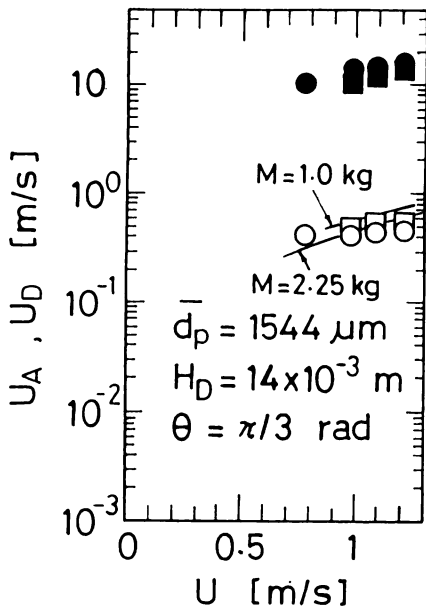


Fig. 19 U_A, U_D vs. U
 ($d_p=1544\mu\text{m}$, $H_D=14\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta = \pi/3\text{rad}$)

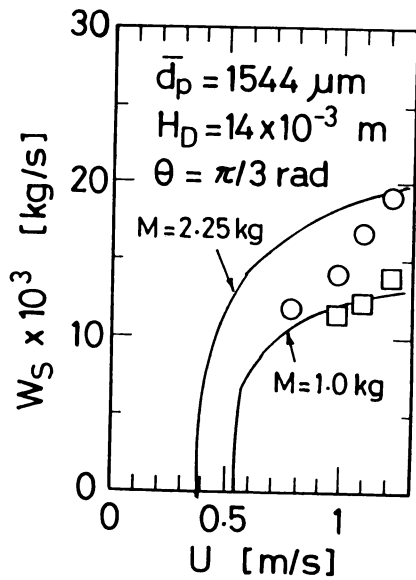


Fig. 20 W_s vs. U
 ($d_p=1544\mu\text{m}$, $H_D=14\times 10^{-3}\text{m}$, $\theta = \pi/3\text{rad}$)

Fig.21に層内が流動化した場合の気泡生成の様子の典型的な例を示す。最初、ブリッジが出来ることによって空隙が生じ、その空隙が次第に大きくなり、粒子の重さにブリッジが耐えられなくなって粒子が一挙にコーン下部に落ち込むことによって気泡が生じ、その気泡はアニュラス部内を上昇して行く。

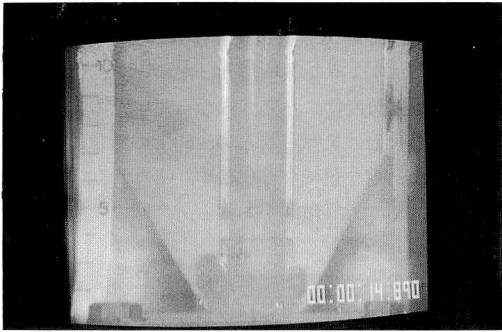


Fig. 21 典型的な気泡上昇パターン
($d_p=277\mu\text{m}$, $H_D=25\text{mm}$, $\theta = \pi/3\text{rad}$,
 $U=1.217\text{m/s}$, $M=2.25\text{kg}$)

Fig.22からFig.24に円錐部角度が50, 60, 70度の場合にできるブリッジの様子を撮影した写真を示す。

これらの写真より50, 60度の場合に比べて70度の場合には、空隙が小さいことが分かる。そのために粒子の落ち込む周期が短く、またガス速が増加するとこの周期が短くなって粒子循環量が増加するものと思われる。

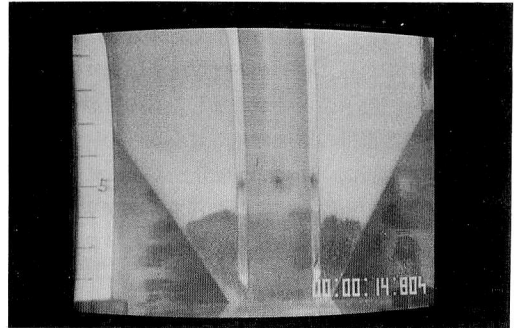


Fig. 22 ブリッジの様子 ($\theta = 5/18\pi \text{ rad}$)

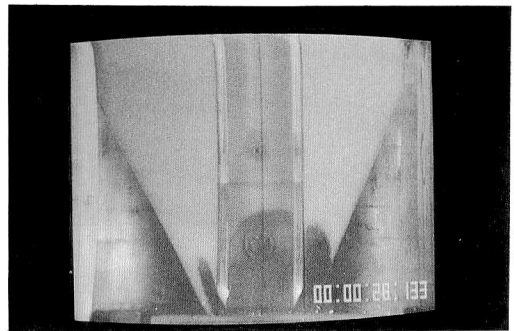
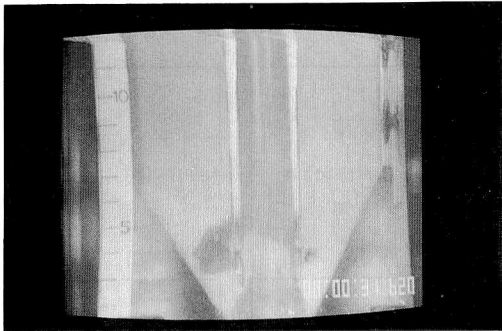


Fig. 23 ブリッジの様子 ($\theta = \pi/3 \text{ rad}$)

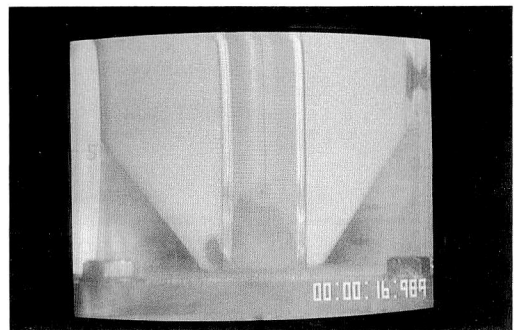
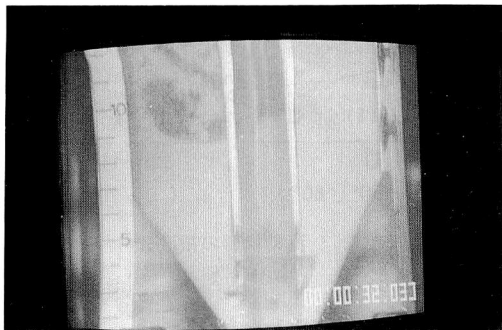


Fig. 24 ブリッジの様子 ($\theta = 7/18\pi \text{ rad}$)

円錐部角度が50, 60及び70度の場合, Fig. 9, 12, 14より粒子充填量が1.0kgで空塔ガス速度が最大の時, 僅かではあるが粒子循環量が増加していることが確認できる。そこで, このときの写真をFig.25に示す。

またFig.16のように180度の場合はそのような傾向は見られない。これについても写真をFig.26に示す。Fig.25においては、ドラフトチューブ後ろ側に層表面まで続くような溝が存在しており、まるでチャネリングのようになっている。これによってガスはこの溝を優先的に流れるために他の粒子に対するガスによる抵抗が減少するために粒子がドラフトチューブ内に落ち込み易くなり、粒子循環量が増加したものと思われる。一方、粒子循環量の増加の見られなかった円錐部角度が180度の場合、Fig.26から分かるようにドラフトチューブ先端の円筒全体にわたってガスが吹き出しており粒子が供給される道がないために粒子循環量の増加が起きなかったものと思われる。

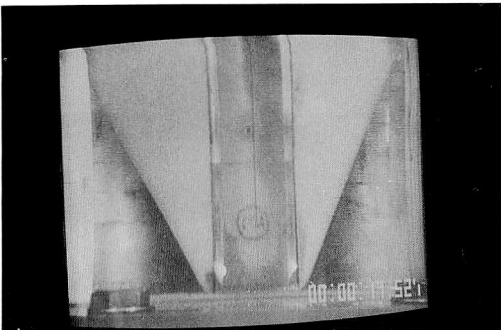


Fig. 25 ガス速最大の時のアニュラスの様子 ($\theta = 5/18\pi$ rad の場合)

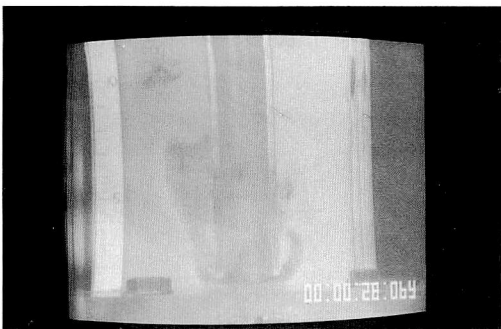


Fig. 26 ガス速最大の時のアニュラスの様子 ($\theta = \pi$ rad の場合)

3. 6 実験式の導出

アニュラスガス速度の実験式の導出

アニュラスガス速度について、各操作因子の影響に関する相関式を導出した。アニュラスガス速度は、空塔ガス速度 (U) に対しては、最初減少した後に徐々に増加していく。そこで $U=0.35\text{m/s}$ を境界として以下のような実験式を導いた。また粒子充填量が 1.0kg

の場合のいくつかの実験では、アニュラス層内において流動化が起こったために、流動化していない場合のアニュラスガス速度とは異なったパターンを示したので、分けて計算を行った。

粒子循環量の実験式の導出

粒子循環量 (W_s) に関する相関を実験データから導いた。前述の実験結果より、 W_s 対 U のパターンを、Fig.27に示すような領域に分けた。 W_s の U に対する傾向が円錐部角度によって、異なっていたのでこの図のように場合分けを行った。50, 60度の場合には、粒子循環量が一定な領域が存在せず、また70度の場合については、やや上昇傾向があるが、今回は円筒モデルとの関連より一定とした。^{5,6)}

実験式の導出に際しては、Fig.28に示すように、実験データを両対数グラフにプロットし、その傾きを求めることによって各操作因子の影響を指数で表す方法を採用した。

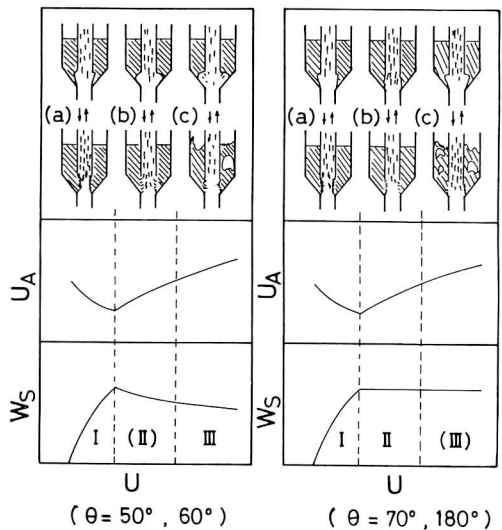


Fig. 27 流動状態の領域分け

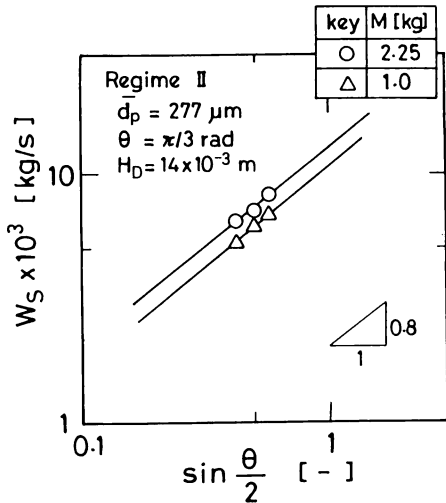


Fig. 28 実験式の導出図

アニュラスガス速度の実験式

<Regime I> ($U < 0.35 \text{ m/s}$ の時)

$$U_A = 1.74 \times 10^{-3} U^{-0.5} H_D^{0.7} \left(\sin \frac{\theta}{2}\right)^{0.9} M^{-0.3}$$

<Regime II & III> ($U > 0.35 \text{ m/s}$ の時)

$$U_A = 3.81 \times 10^{-6} U^{1.4} H_D^{0.6} \left(\sin \frac{\theta}{2}\right) d_p^{1.5} M^{-0.75}$$

*アニュラス部が流動化している場合

$$U_A = 0.0400 U^{2.0} H_D^{0.5} \left(\sin \frac{\theta}{2}\right)$$

粒子循環量の実験式

<Regime I>

$$W_s = 4.8 \times 10^{-3} (U_D - u_t)^{0.2} H_D M^{0.3}$$

<Regime II>

$$W_s = 1.38 \times 10^{-3} H_D^{1.3} \left(\sin \frac{\theta}{2}\right)^{0.8} M^{0.3}$$

<Regime III>

$$W_s = 7.04 U^{-0.3} H_D M^{0.2}$$

4. 結 言

半円筒のドラフトチューブ付き噴流層において、アニュラス部内ガス流速 (U_A)、ドラフトチューブ内のガス流速 (U_D) 及び粒子循環量 (W_s) に対するチューブ間距離、円錐部角度、粒子径及び粒子充填量の影響

を検討し、以下の結論を得た。

1) アニュラス部内ガス流速 U_A は、チューブ間距離、円錐部角度及び粒子径を大きくすることで増加し、粒子充填量を大きくすることで、減少した。また、空塔ガス速度 U の増加に伴い、粒子径の比較的小さい粒子では、最初わずかに減少してから、連続的に増加していくことが確認できた。

2) ドラフトチューブ内のガス流速 U_D は、空塔ガス速度 U の増加に伴い、単調に増加した。

3) 粒子循環量 W_s は、チューブ間距離、粒子径及び粒子充填量を大きくすることで増加した。また、円錐部角度が、50、60度の場合と、70、180度の場合とは、異なった傾向を示した。

Nomenclature

| | | |
|----------|----------------|----------------------------|
| Ar | アルキメデス数 | [-] |
| D_D | ドラフトチューブ内径 | [m] |
| D_N | 入口ノズル内径 | [m] |
| D_T | 外円筒内径 | [m] |
| d_p | 粒子の3乗2乗平均径 | [μm] |
| f_x | ガスの摩擦係数 | [-] |
| g | 重力加速度 | [m/s^2] |
| H_D | チューブ間距離 | [m] |
| L | アニュラスタップ間距離 | [m] |
| M | 粒子充填量 | [kg] |
| Q_A | アニュラス部内ガス流量 | [cm^3/s] |
| Q_D | ドラフトチューブ内ガス流量 | [cm^3/s] |
| Q_T | 空塔ガス流量 | [cm^3/s] |
| Re_t | 終末速度におけるレイノルズ数 | [-] |
| S_A | アニュラス部断面積 | [cm^2] |
| S_D | ドラフトチューブ断面積 | [cm^2] |
| S_T | 塔本体断面積 | [cm^2] |
| U | 外円筒基準の空塔ガス速度 | [m/s] |
| U_A | アニュラス部内ガス流速 | [m/s] |
| U_D | ドラフトチューブ内ガス流速 | [m/s] |
| u_{mf} | 粒子の最小流動化速度 | [m/s] |
| u_t | 粒子の終末速度 | [m/s] |
| W_s | 粒子循環量 | [kg/s] |
| θ | 円錐部角度 | [rad] |
| μ | 流体の粘度 | [Pa·s] |
| ρ_f | 流体の密度 | [kg/m^3] |
| ρ_p | ガラスビーズの密度 | [kg/m^3] |

Literature cited

- 1) Ijichi, K., Y. Tanaka and K. Yoshida, *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, 14, 566, (1988).
- 2) D. Geldart, "Gas Fluidization Technology", University of Bradford, UK, 348-350, (1986).
- 3) 坂下攝：入門粉体トラブル工学 (1986).
- 4) 日本粉体工業技術協会：粉体成形ハンドブック (1987).
- 5) 吉見隆：鹿児島大学卒業論文 (1989).
- 6) 宮内正彦：鹿児島大学卒業論文 (1990).