

循環流動層に於ける流動粒子の流れパターン

加藤 泰生*・宮本 政英*・L.R.Glicksman**

Flow Patterns of Fluidizing Particles in a Circulating Fluidized Bed

Yasuo KATOH, Masahide MIYAMOTO and LEON.R. GLICKSMAN

Abstract

This report describes the flow patterns and flow characteristics of a gas and solid mixed phase flow (air and glass bead particles) in the riser of a CFB (circulating fluidized bed). Flow patterns strongly depend on the inlet air flow rate and the relative flow rate of circulating particles. Therefore these fluidization patterns were clarified three groups, which belong to three regions: slugging or turbulent, fast and dilute. These flow patterns have differing characteristics from each other. Furthermore, in the regions of fast and dilute fluidization, clusters of fluidizing particles were observed.

1. まえがき

循環流動層は、多量の粒子を速い流速の状態流動化し循環させるため、固気接触が極めて良好であることが特徴である。今、実機での問題に、ライザー壁やその他、部材内壁での摩耗(エロージョン)、あるいは高温でのサイクロン装置(固気分離装置)の構造、負荷変動時の燃焼と粒子循環量との動的制御などがある⁽¹⁾⁻⁽³⁾。応用開発の為に、循環流動層の基本的な流れ構造、熱交換機構、燃焼構造などにまだ多くの未知の部分が残っており、これらを調べる必要がある。本研究の最終目標はこれらを解明することである。

本報では、流れ方向に対して正方形断面を有する比較的小型のテストセクション(ライザー)を持つ循環流動層コールドモデルを作成し、テストセクション高さ方向の圧力損失の分布、写真撮影等により、テストセクション内の流れのパターンを見たものである。使用循環粒子はガラスビーズ平均径 $200\mu\text{m}$ である。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。テストセクションのライザー部は透明アクリル樹脂製で、一辺が 33.7mm の正方形断面を有しており、その高さは 1670mm である。デストリビューターを通して送り込んだ空気は、粒子を流動化させる。飛出した粒子は、サイクロンで捕集され内径 38mm の下降管を通してLバルブ前段で貯えられ再び2次空気によってライザー内へと送られる。層内空塔速度は、オリフィス、ロータメーターを使って測定した挿入空気量を、断面積で除すことで求めた。循環粒子量は下降管途中のボールバルブを閉じた際粒子が予め設定された体積を満たすまでの時間を測定することで求められる。デストリビューターは内径 34mm 、幅 33mm の半円筒形の側面に 3mm の穴を開けたものを用いている。テストセクション各部の圧力損失の測定のためにデストリビューター下流壁面に6ヶ所の圧力タップを設け上流に1ヶ所設けられている。使用粒子は平均粒径 $200\mu\text{m}$ 、比重 $2520\text{kg}/\text{m}^3$ のガラスビーズである。その粒度分布を図2に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 最小流動化速度

*機械工学部

**Massachusetts Institute of Technology

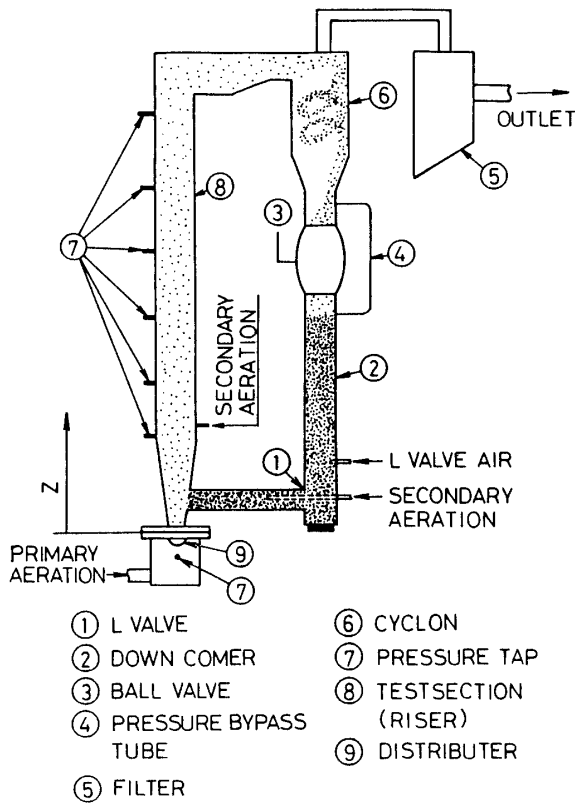


Figure. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

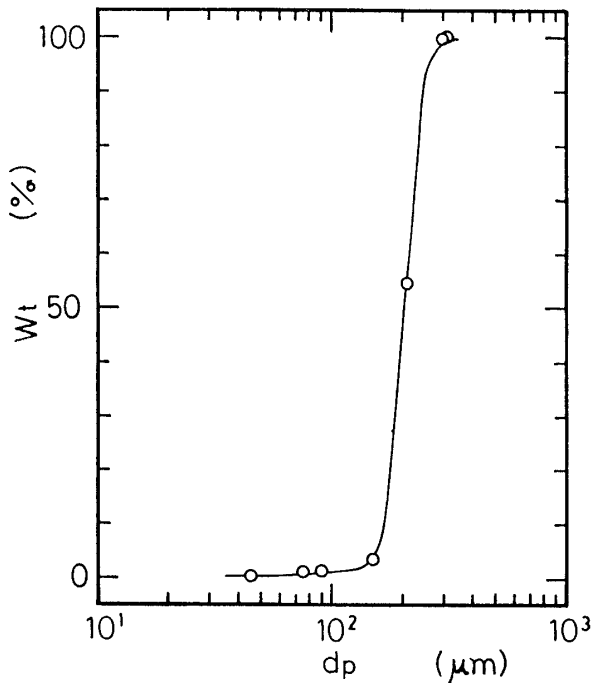


Figure. 2 Size distribution of glass beads.

最小流動化速度の測定は、本装置全体が循環型でダウンカマーにも繋がっていて、気流のダウンカマー側への吹きぬけがあるため、正確な測定ができなかった。そのためデストリビューターから下流を別装置で代用することで行った。図3に最小流動化速度の測定値および以下の式(1) (Wen-Yuの半実験式⁽⁴⁾)からの値を示す。測定による最小流動化速度は、式による値より幾分高い値を与える。また測定による最大圧力損失は計算値とほぼ等しい。層高が低い時のこれらの圧力損失のずれは、測定の際の粒子のデストリビューターからの若干の落下によるものと思われる。

$$Re_{mf} = [(33.7)^2 + 0.0408Ar]^{1/2} - 33.7 \quad (1)$$

ここで、 Re_{mf} は最小流動化レイノルズ数= $U_{mf} \cdot d / \nu$ 、 Ar はアルキメデス数である。

3.2 循環粒子量と流速

図4は、それぞれ循環粒子量Gsと空塔速度 U_0 の関係を見たものである。それぞれ任意の粒子循環量を一定に保ち得る、最小の空塔速度が確かに存在する。従って、粒子循環量を増やすためには、この最小の空塔速度を増やす必要がある。武内らの例⁽⁵⁾にならって、この最小速度の値を結ぶことで得られる境界の線を、 U_{FT} 線と称す。これを境に流れの機構が変わるものと思われる。

3.3 流れ方向圧力損失分布

図5に循環粒子量を一定にした場合の、流れ方向圧力損失分布を示す。従って、実験は U_{FT} 線より右の流速の速い領域でおこなっていることを意味する。縦軸の流れ方向距離はライザー高さで無次元化している。また図6はこの圧力損失から、以下の式で算出される粒子充填率分布を示す

$$1 - \epsilon = \Delta P / (\rho_s \cdot g \cdot \Delta L) \quad (2)$$

ここで、 $1 - \epsilon$ は粒子充填率[-]、 ΔP は圧力損失[mm H₂O]、 ΔL は圧力タップ間距離である。

空塔速度が、比較的速いところでは、高さ方向に圧力の損失が一樣に生じる領域があり、この領域では流れが粒子濃度の均一な流れになっていることを示している。また U_0 の増加に反比例して、圧力損失の程度が小さくなっており、これはより粒子濃度が希薄であることを意味している。

図7は、同様の条件で粒子循環量が一定の時の、高さ $Z=0.741m$ と $Z=1.28m$ における圧力損失の空塔速度に関する値をプロットしたものである。空塔速度の増加にともないこの両者の値は接近していき遂には一

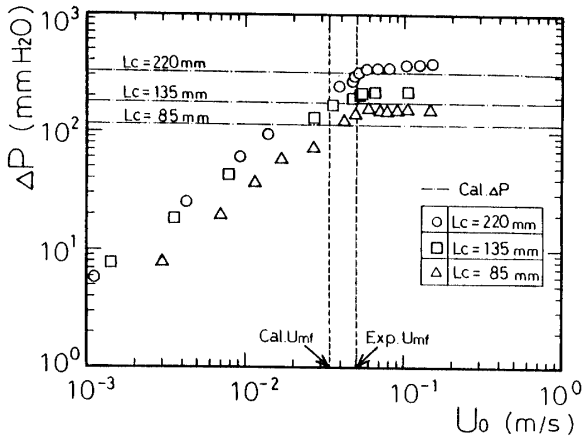


Figure. 3 Minimum fluidizing velocity.

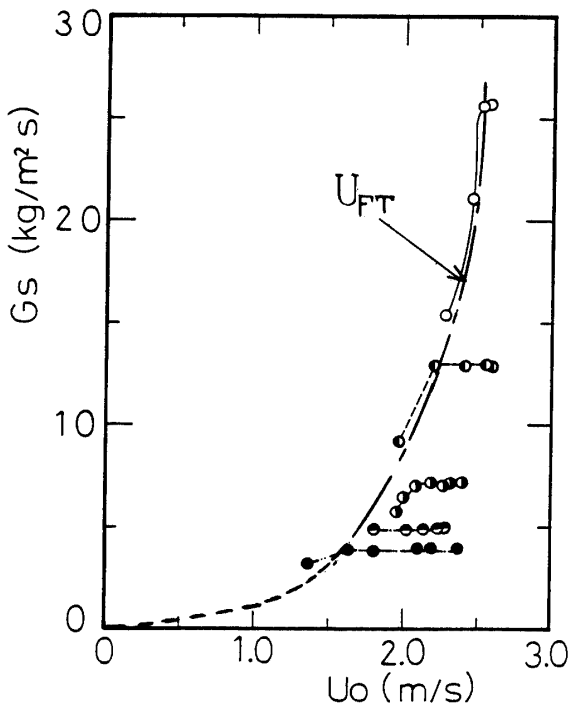


Figure. 4 Circulating particle flow rate G_s vs. superficial gas velocity U_0 .

致する。このことはある流速以上ではこの両者の高さ位置で粒子濃度が等しくなることを意味する。そしてこの交点の速度を武内ら⁽⁹⁾にならって、 U_{DF} と称し、これら交点を図の様に結んだ線を U_{DF} 線とする。これを境に流れの機構が変わるものと思われる。

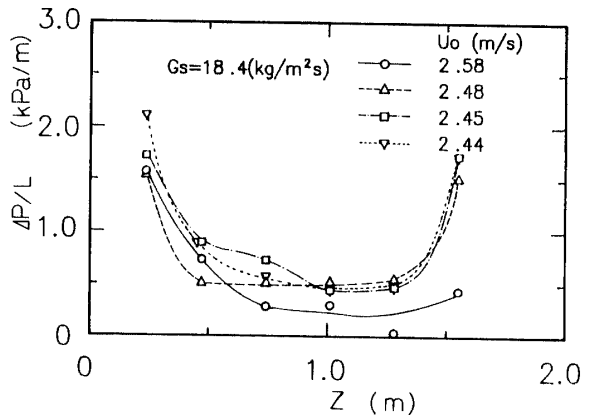
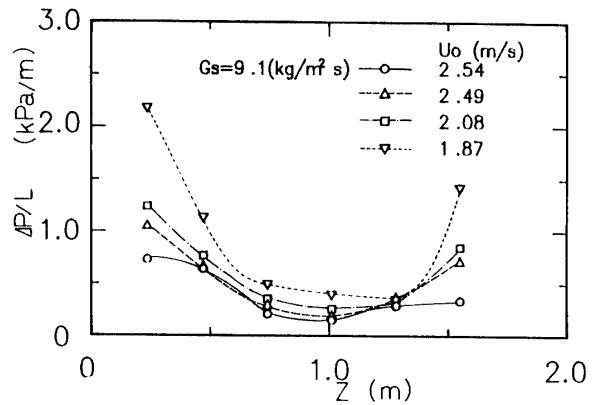
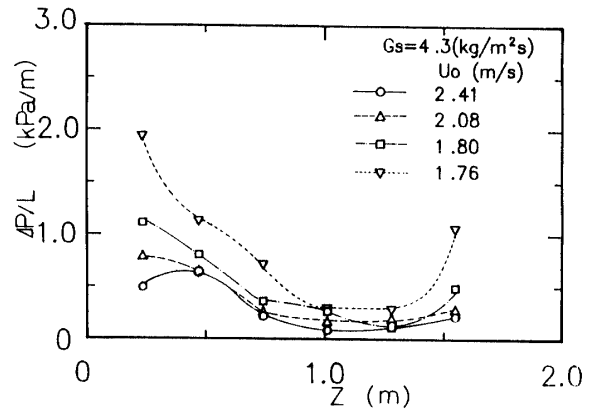


Figure. 5 Pressure drop ΔP in streamwise flow (constant G_s).

3.4 流動様式

図4ならびに図7でえられたそれぞれ U_{FT} 線、 U_{DF} 線を境に流動の状態が異なることは圧力損失等から明らかであるが、これを写真撮影から見てみる。 U_{FT} 線から左の領域ではまず写真1に見られるように、大きなバブルが塔径一杯になって粒子層を持上げるスラギング流動状態 (Slugging Fluidization) とされる流動状態にある。写真2の様に空塔速度が増し U_{FT} 線近傍の流

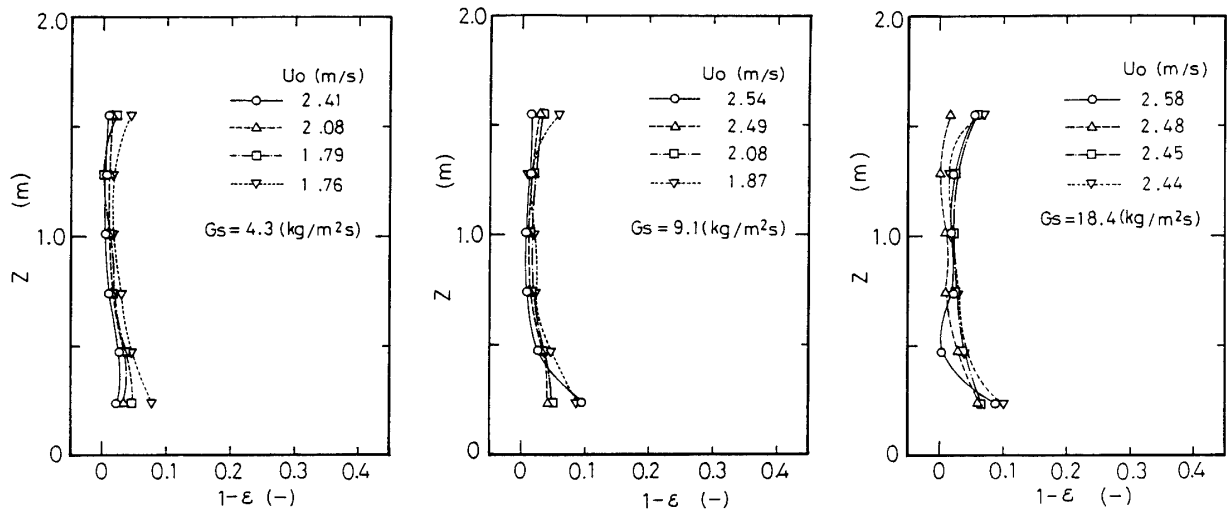


Figure. 6 Particle volume fraction in a riser (constant Gs).

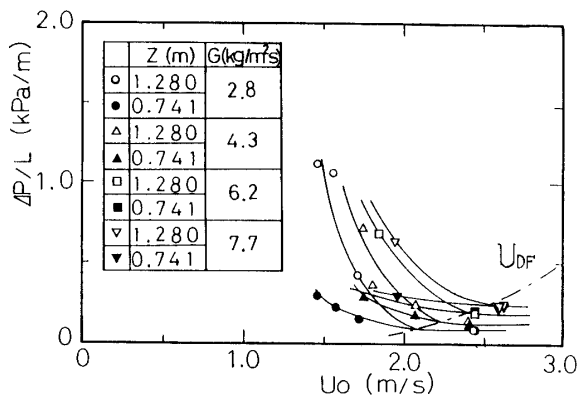


Figure. 7 Pressure drop ΔP vs. superficial gas velocity U_o (at $Z=0.741\text{m}$ and $Z=1.28\text{m}$)

れにおいては、粒子の濃度の濃い領域が散見され気泡はこの中で細長い状態で上昇、あるいは合体・分裂をする、いわゆる乱流流動状態 (Turbulent Fluidization) と言われる流れ状態に達する。さらに空塔速度が U_{FT} 線を越えると、写真3の様に粒子の塊がみられるようになり (これをストランド、あるいはクラスターと呼ぶ)、幾分流れは定常状態になり、粒子の循環量も安定してくる。この流れをファースト流動状態 (Fast Fluidization) と称する。この粒子塊が生成崩壊する過程における粒子挙動は、固気接触を良好にし燃焼時には最もア

クティビティに富んだ役割を演じるため最も興味ある現象といえる。さらに粒子速度を増し U_{DF} 線を越えると、写真4に見られるように粒子が希薄に分布し、時折、塊が通過するが稀であるような希薄流動状態 (Dilute fluidization) と称する流れ状態となる。

4. あとがき

流れ方向に対して正方形断面を有する比較的小型のテストセクションを持つ循環粒動層コールドモデルを作成し、テストセクション高さ方向の圧力損失の分布、写真撮影等により、テストセクション内の流れのパターン様式を観察した。

今後、高速ビデオによる流れ観察とともに、各流れ領域、特にファースト流動状態 (Fast Fluidization) の流れ構造、熱伝達機構を鋭意研究の予定である。

謝 辞

本研究で使用した装置はMIT 機械工学 Dr コースの学生 D. Westphalen 君の装置図面を参考に造られたものであることを記して、謝意を表します。また卒論研究として本装置の製作、実験の遂行に多大の協力を頂いた、松尾政浩君に感謝致します。

循環流動層に於ける流動粒子の流れパターン

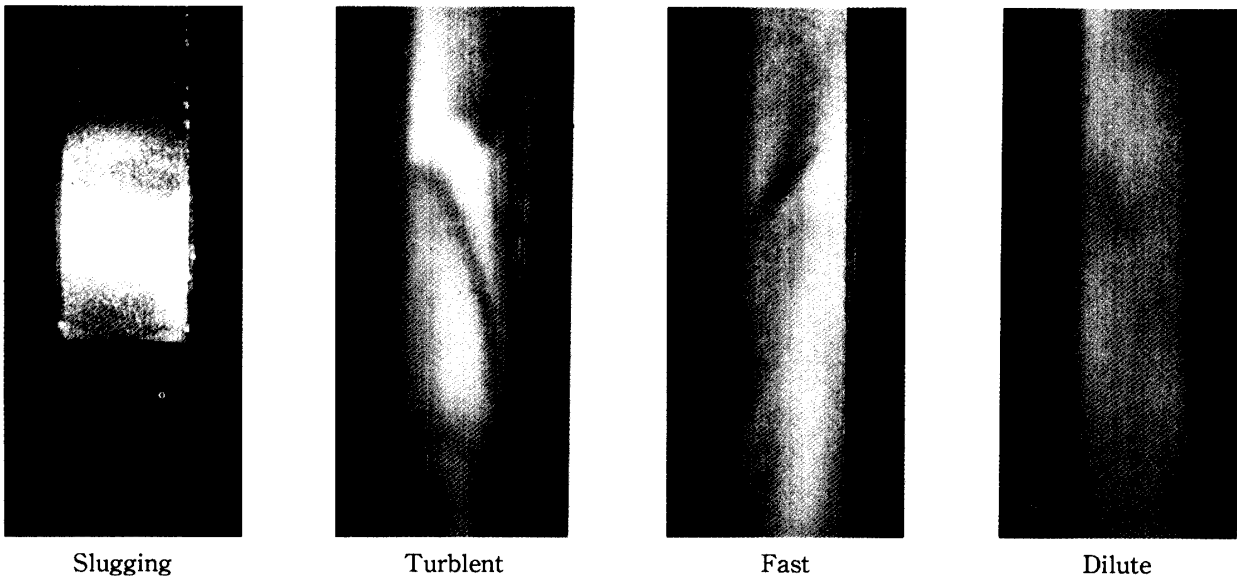


Photo. 1 Classification of flow patterns in CFB.

主な使用記号

A	: テストセクション断面積	[mm ²]
Ar	: アルキメデス数	[-]
d _p	: 粒子径	[mm]
L	: テストセクション長さ	[mm]
ΔP	: 圧力損失	[mm H ₂ O]
Re _{mf}	: 最小流動化レイノルズ数	[-]
U ₀ , U _{mf}	: 空塔速度, 最小流動化速度	[m/s]
U _{FT} , U _{DF}	: 図の上から定義される境界速度	[m/s]
ギリシャ文字		
ρ	: 密度	[m ³ /kg]
ε	: 空隙率	[-]
ν	: 動粘度	[m ² /s]

参考文献

- (1) 大下孝裕, 化学装置1991年2月号、p33
- (2) Proc. Workshop on Materials Issues in Circulating Fluidized Bed, Research Report Center (1990)
- (3) Proc. of the 3rd SCEJ Sympo. on Circulating Fluidized Bed, Tokyo, June 14-15, 1989
- (4) Wen. C. Y. & Yu, Y. H., AIChE J., Vol. 12, (1966) p.610
- (5) 武内 洋, 北海道開発試験場報告第50号、1990-3、INNS0441-0734

(平成3年10月30日受理)