

気泡型流動層における固気二相流動の可視化研究

(第一報：試験装置における全体的特性と流動状況)

山口信行* 緒方正幸** 宇都智靖***

1. はじめに

流動層燃焼方式は、難燃焼性の粗大燃料も含めて多様な燃料を燃やせることや脱硫等の環境対策を行いやすいこと等の観点から近年注目されてきており、最近の火力発電所やごみ処理施設などで流動層型ボイラーの利用が相次いでいる。明星大学機械工学科流体工学研究室では、循環流動層への展開も考慮に入れて、気泡型流動層内での流動状態の流れの構造の解明とそのコントロール方法の研究に着手した。

本稿では、流動層二次元可視化実験装置の紹介と実験により観察された興味深い現象についてその一部を報告する。

2. 流動層研究とそれに関する概況

容器内に充填された粉粒体の層に底部より空気を送ると、全体としてあたかも沸騰する液体のような振る舞いを始める。これが粉粒体の流動化状態であり、この層を流動層と呼んでいる。その流動状態は送り込まれる気体の流速とともに変化し、代表的な状態としては図1に示すような、均一流動、気泡流動、スラグ流動、乱流流動、高速流動という状態が見られる。

流動層は化学工学における単位操作の一つとして化学工業の様々な分野に用いられてきた。さらに上に述べた特長のため利用範囲は広がり、現在では大型の機械装置やプラント、例えば火力発電用の燃焼炉などに採用され始めている。この流動層に関しては、機械工学、特に流体工学と粉体工学、そして熱工学、化学工学等の様々な工学分野から分析的かつ総合的に取り組まれている。しかし、混相流であることもあって極めて複雑な現象を含み、まだ研究すべき分野を多く残している。現在の様々な技術がそうであるように、流動層はその特長を生かしながら、環境・資源問題の進展とともに実機として独自の発展を続けていると言えよう。このため、工学的研究が実状に十分追いついていない状況とも考えられる。

気泡型流動層の研究に関しては流動パターンの詳細、影響する重要な因子、気泡の成長から破裂に至る過程、気泡の発生頻度、層内流動状況、燃焼効率・反応速度等々に対しての研究が多くなされており[1～3]、またこれを応用する対象機器に即した極めて実機的なやり方で研究されることも多かった。最近では計算流体力学(CFD)を用いた研究も

*理工学部 機械工学科 教授 流体力学

**理工学部 機械工学科 助手 流体力学

***理工学研究科 機械工学専攻 修士課程

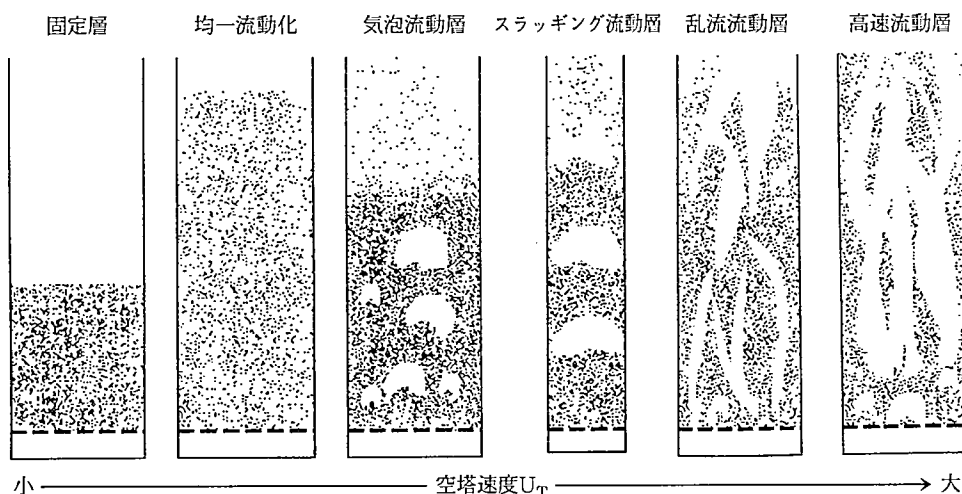


図1：代表的な流動状態（[1]より引用）

多くなされ始めている。しかし、気泡流動域を超えた領域での現象については、報告も少ないようであり、実験的観察はまだ重要であろう。

さらに循環流動層は、乱流流動や高速流動よりも高速の気流が用いられている。しかし、その底部での現象は、乱流流動や高速流動に近い現象と考えられる。塔上部の、ガスにより輸送される粒子の挙動についての報告は始めているようであるが、この底部の現象についての報告は少ない。

乱流流動・高速流動は、気泡流動に比べ内部状態が極めて複雑であり、流動状態の詳細や特性は十分に解明されていない部分が多くある。特に、流動状態のミクロな構造は解明されているとは言い難く、このために、実機を運転する際にも、経験的かつ実験的な予備情報が必要となるのが現状である。これらの領域について、現象の構造や特性を研究することは大きな成果を得られると考えている。

また、流動状態を何等かの方法でコントロールできれば、例えば、ごみ処理に応用される場合のように、ごみの大きさや質量によって流動状態を制御できれば、工業的に非常に役に立つであろう。最近では、内部循環を炉の形式と適切に組み合わせたり、流動状態を安定させるための粒子サイズの組み合わせ等を工夫する例も見られる。しかし、現象の複雑さと激しさのため、まだ十分に確立されていないのが現状のようである。このようにコントロール方法という観点からも研究し、工夫できれば実用的な成果を得られる可能性もある。

3. 研究の狙い

このような観点から、我々は気泡流動層の高速領域に関して次の点を実験的に調査することを狙っている。

- (1) 複雑な内部流動状態の観察と量的な関係の明確化
- (2) 粒子混合・攪拌の効果の評価法の検討
- (3) 流動状態のコントロール方法の研究

このために、現象的な観察とそれに伴う変動量の関係を把握する手段として、我々の研究は次の点を中心として実験研究を始めたところである。

(1) 流動層二次元スライスモデルの採用

(2) 流れパタンの可視化と変動圧力波形の同期観察

二次元スライスモデルは、流動層の横幅を広く、奥行きを薄くすることで二相流動パターンを観察しやすくしたものである。これは実流動層では起こることのない状況ではあるが、流動状態をきわめて可視化しやすく、かつ操作しやすい。このため、特徴的な現象の理解と把握、明確化のために採用した。実流動はきわめて三次元的な現象であるが、後でも述べるように、固気二相流動の重要な特性は失われていないと判断している。

さらに、写真や高速ビデオによる撮影・記録と同時に圧力変動の波形も同期測定し、画像と波形の同期観察による現象の理解と評価を深めようとした。これらが、画像波形同期取得解析システム（ISODAS）の利用により可能となっている。ISODASは「Data Acquisition and Analysis System of Images and Synchronous Oscillograms」の略称で、

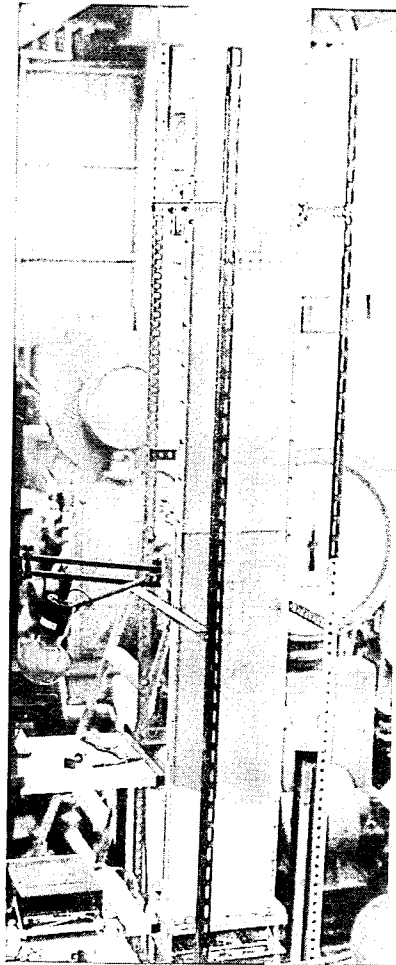


図2：実験装置

平成7年度私学助成金により当研究室に整備されたシステムで、その詳細については[4]を参照されたい。

4. 流動層可視化実験装置

以上に述べた狙いを達成するために図2に示す実験装置を設計・製作した。この装置の全体図を図3に、装置諸元を表1に示す。

図3において遠心送風機①から供給される空気は配管②をへて、配管中央部に設置されたオリフィス流量計③を通り、エルボにより垂直に立ち上げられ、整流部④により整流される。整流部は急拡大及び二種類の金網（ステンレス製、メッシュ数22, 16）を用いており、三段階の構造により気流は整流され、観察塔⑤に流入する。この観察塔は高さ3,000mm×横幅290mm×厚み18mmの鉛直流路であり、二次元性を十分に確保している。可視化実験を行うために表面・背面ともにアクリル板を用いて内部を観察しやすい構造としてある。この内部に粒子を充填し流動状態の観察を行う。アクリル板表面には内部の状態の大きさ

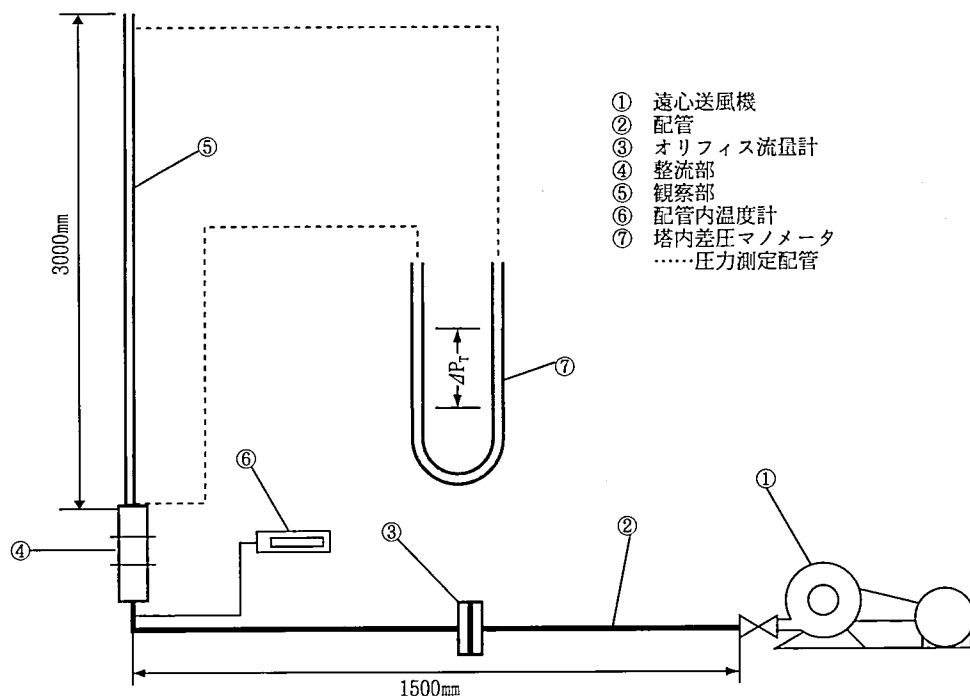


図3：実験装置概略図

表1：実験装置諸元

観察塔内最大風速	15m/s
観察塔寸法	高さ3000×横幅290×厚み18(mm)
許容充填層高	700mm(粒子性状に依存)
モータ	三相超分巻電動機
送風機	2.2KW, 4 m ³ /min×600mmAq

例えば気泡などを測定できるように100mmおきに1,000mmまで目盛り線を引いている。また、観察塔内の断面平均空気流速、すなわち空塔速度は最大で15m/sである。

さらに、配管内の空気温度を測定するため熱電対温度計が、そして流動化粒子を充填する観察塔内の差圧測定及び配管内の流量を測定するため水柱マンメータが設置してある。

なお、今後の実験内容に応じて各種測定機器を取り付けることも可能である。

5. 実験手順と条件

製作した実験装置を用いて空塔速度 U_T と塔内差圧 ΔP_T を常時測定すると同時に、流動層の基本的な流動状態を観察・写真撮影等を行う。また、測定結果をもとに流動層の二次元モデルの妥当性を調査する。

今回の実験においては流動化粒子として表2に示すプラスチック粒子を用いた。粒子直径は100個の粒子の直径をマイクロメータで測定し、その幾何平均を一個の粒子の代表直径 d_p とした。また、粒子密度は500個の粒子の質量を電子秤で測定し、その平均を一個の粒子の代表質量とし、質量/体積により代表密度 ρ_p とした。

表2：使用粒子

材 質	スチロール材
代表直径(d_p)	1.38mm
代表密度(ρ_p)	1090kg/m ³
粒子形状	白色球形

この粒子を無風時に所定の充填層高 h_T (50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600 mm) になるようランダム充填した後、空塔速度 U_T を徐々に上げていき、先に図1に示したそれぞれの流動状態の開始点での空塔速度 U_T と塔内差圧 ΔP_T を測定し、さらに写真撮影等も行う。

ここで塔内の断面平均空気流速を空塔速度 U_T として、オリフィス流量計により測定された流量がすべて観察塔へ流入するとして算出し、塔内差圧 ΔP_T は観察塔の上下に設けられた静圧孔により内部の差圧を測定する。この測定には水柱マンメータを使用した。

6. 実験結果

6. 1. 流動化曲線

プラスチック粒子の流動化実験におけるそれぞれの流動状態に対する空塔速度 U_T と塔内差圧 ΔP_T の関係、すなわち流動化曲線を図4に示す。この図にプロットされている各点はそれぞれの状態の開始点である。空塔速度 U_T を徐々に上げていくと、●点で、粒子層は流動化を開始する。流動化開始とは、層内部で粒子が小さく振動したり、層表面で粒子が飛び跳ねたりしている状態である。この状態が初めて観察されたときを「流動化開始」と呼ぶ。次に、○点で、層内に気泡が発生する「気泡流動」に状態を変える。さらに、▲点で、層は激しい変動を示す「乱流流動」に移行する(図中の――線は変動範囲を示す)。その後さらに U_T を増加させると、△点で、「高速流動」に移行する。

この粒子の流動化曲線は、差圧 ΔP_T に着目して大きく3種類の傾向のグループに分類

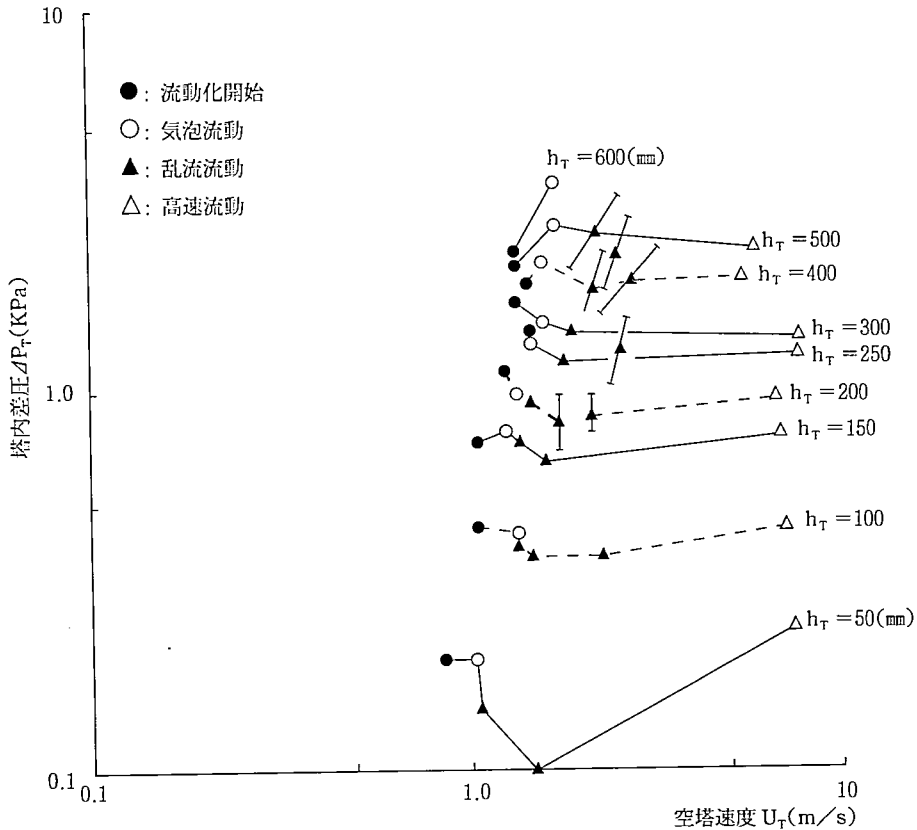


図4 プラスチック粒子の流動化曲線

できることが分かった。流動化開始点の差圧 ΔP_{TS} と気泡発生時の差圧 ΔP_{TB} の変化に着目すると、層高 $h_T = 50 \sim 150 \text{ mm}$ までは $\Delta P_{TS} \approx \Delta P_{TB}$ であり、次に、 $h_T = 200 \sim 300 \text{ mm}$ までは $\Delta P_{TS} > \Delta P_{TB}$ であり、 $h_T = 400 \sim 600 \text{ mm}$ においては $\Delta P_{TS} < \Delta P_{TB}$ となっている。

これらの代表的なものとして $h_T = 100, 200, 400 \text{ mm}$ の曲線が、図中の破線により表示してある。状態曲線の傾向がこのような異なる原因は、気泡の発生と成長の様子が層高に依存することに関係していると考えられるが、この詳細に関しては今後調査を行っていく。

さらに、乱流流動状態における差圧 ΔP_{TC} は大きく変動するが、平均値は気泡発生時の差圧 ΔP_{TB} と比べ全体的に低くなっていることが分かる。この圧力変動は層高に比例して大きくなる傾向が見られる。

高速流動状態に移行すると、差圧 ΔP_{TC} は大きな変動を示さず、層高に応じたほぼ一定値を取っている。この時の空塔速度 U_{TC} は、全体的にどの層高においても約 7.0 m/s となっている。

6. 2. 無次元表示による流動特性

実験で得た流動化曲線の空塔速度 U_T と塔内差圧 ΔP_T を規準化し、それぞれ、無次元流速 U_T^* 、無次元圧力 P_T^* として、流動状態の分布を示したものが図5である。 U_T につい

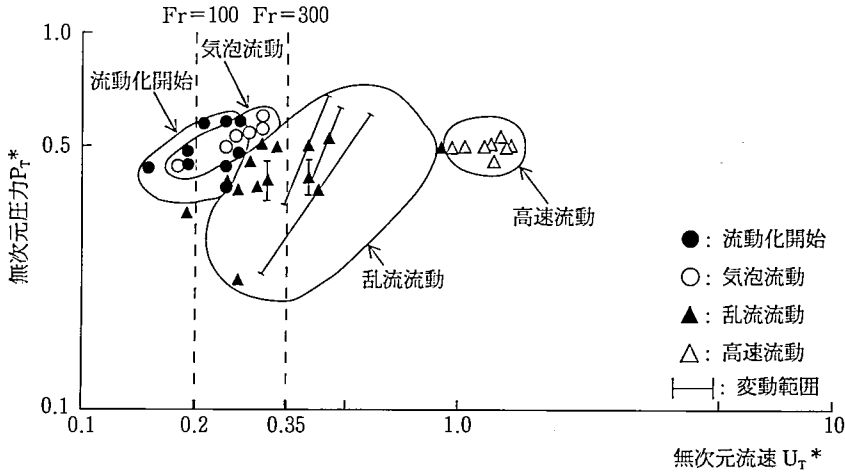


図5 流動状態分布図

ては基準流速として単一粒子の終端速度 U_0 を用いて規準化した。

粒子に作用する力、重力 F_g と抗力 F_D は次式で表される。

$$F_g = (\rho_p - \rho_f) \cdot (\pi d_p^3 / 6) \cdot g \quad (1)$$

$$F_D = C_D \cdot (\pi d_p^2 / 4) \cdot (\rho_f U_0^2 / 2) \quad (2)$$

粒子の終端速度は、流体中を粒子が落下するとき、粒子にかかる重力 F_g と流れによる抗力 F_D が釣り合い等速運動となる速度、また、鉛直上向きに流した場では、この釣り合いにより粒子が浮遊状態となる速度である。すなわち、(1)式と(2)式の釣り合いにより U_0 は次式となる。

$$U_0 = \{3/4 \cdot (1/C_D) \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot d_p / \rho_f\}^{1/2} \quad (3)$$

さらに、この粒子の終端速度 U_0 は、抗力係数は $C_D = 0.44$ の一定の領域内にあることから、次式で表される。

$$U_0 = \{3.03 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot d_p / \rho_f\}^{1/2} \quad (500 < \text{Rep} \leq 10^5) \quad (4)$$

ここで、使用する粒子の終端速度は、 $U_0 = 5.67 \text{ m/s}$ となる。

無次元流速 U_T^* は次式で表される。

$$U_T^* = U_T / U_0 \quad (5)$$

ここでフルード数 Fr を用いてまとめると(7)式となる。ここで

$$Fr = U_T^2 / d_p \cdot g \quad (6)$$

$$U_T^* = \{(33/100) \cdot Fr \cdot \rho_f / (\rho_p - \rho_f)\}^{1/2} \quad (7)$$

U_T^* とフルード数 Fr は、ほぼ同一の現象を表現していることが分かる。

また、基準圧力として粒子と同じ密度を持つ固体の層高 h_T による自重圧力 P_m を用い

て標準化した。この基準圧力は次式で表される。

$$P_m = \rho_p \cdot g \cdot h_T \quad (8)$$

無次元圧力は次式となる。

$$P_T^* = \Delta P_T / P_m \quad (9)$$

この分布図(図5)は流動状態の特徴を良くまとめていることが分かる。流動化開始、気泡流動状態において分布範囲がほぼ同一箇所にあり、この粒子層においては $U_T^* = 0.1 \sim 0.2$ の範囲で気泡が発生している。

今回の実験においては、 $U_T^* = 0.3 \sim 0.9$ で乱流流動が確認されている。 $U_T^* = 0.35$ は式(7)により $Fr = 300$ に相当することから、この実験では $Fr = 300$ 前後で気泡流動から乱流流動への遷移が始まっていることになる。乱流流動は、これまでの研究により、粒子の終端速度の0.35倍で起るという指摘がなされ、さらに、 $Fr = 100$ で気泡流動から乱流流動に移行する境界が与えられている[1]。 $Fr = 100$ の境界については、今回の観察と十分な一致を示しているとはいえない。この気泡流動から乱流流動へ移行する時の現象や条件については、今後の研究によりさらに調査する予定である。

高速流動は、全体的に $U_T^* = 1.0$ 付近にまとまっている。これは実質的な空気速度が粒子終端速度前後になる状態である。この状態は、「浮遊できる粒子」と「できない粒子」が混在し、内部的にはこれらの部分により形成されている。

U_T^* がさらに大きくなると、多くの粒子が層から気流に乗って飛び出し、層は粒子の補給を必要とする状況になると考えられる。これは循環流動層の底部に存在する状況である。循環流動層とは、塔外へ排出される粒子を捕集し、再び塔内へ供給するシステムを有する流動層である。

この図において、最も興味深い情報は、どの状態においても $P_T^* = 0.5$ 付近に分布していることである。流動化開始・気泡流動・乱流流動に関しては、 $P_T^* = 0.5$ 付近を中心とする変動を示し、乱流流動ではこの変動幅が非常に大きい。高速流動に関しては、 $P_T^* = 0.5$ と一定値である。これらは、粒子層を気流が支えていることを示しており、この数値は粒子密度と充填時の空間率に関係していると考えられる。

6. 3. 二次元モデルの妥当性について

ここで採用した流動層の二次元モデルの妥当性を判断するために、一般に用いられている流動状態線図(図6)との対比を行うことがその参考になるであろう。流動状態線図とは、粒子の物性を示す無次元数であるアルキメデス数 Ar と、様々な流動状態における流速をもとにした粒子レイノルズ数 Rep とにより粒子の物性と流動状態を関係付けたものであり、多くの研究をもとにまとめられたものである。

粒子の物性を表すアルキメデス数 Ar は次式で表される。

$$Ar = d_p^3 \cdot \rho_f (\rho_p - \rho_f) \cdot g / \mu_f^2 \quad (10)$$

実験に用いる流動化粒子に対して $Ar = 8.0 \times 10^4$ となっている。

また、粒子レイノルズ数は次式で表される。

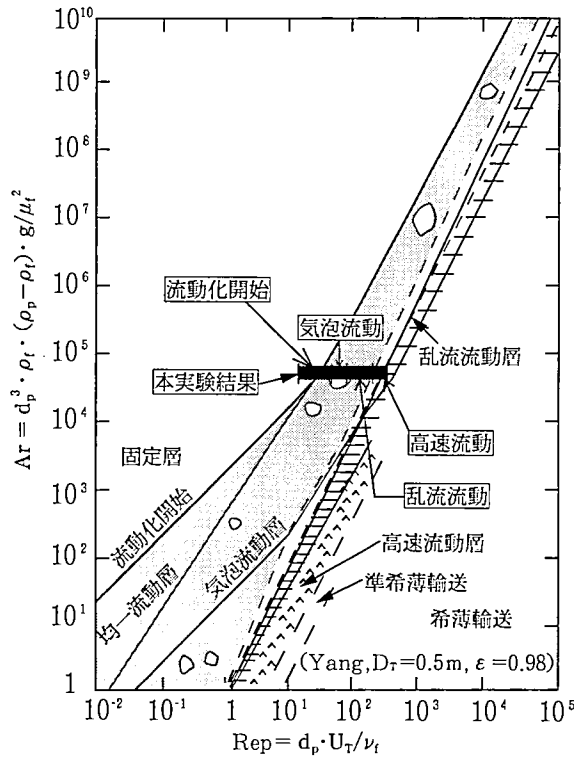


図6：一般的な流動状態線図([1]より引用し、実験結果を表示)

$$Rep = d_p \cdot U_T / \nu_f$$

(11)

実験により測定された流動状態を本図上に対比してある。□で囲まれた部分が本実験による結果であり、よい一致を示している。この事により、本研究における二次元流動層の結果は、一般的な流動パターンから大きくはずれていないと言って良い、と考えられた。

また、過去の研究において、図7に示すような、粒子の直径と密度をもとに粒子の流動パターンの分類がされている。この図は Geldart-map と呼ばれ、広く採用されているものであり、流動状態線図と同様に、粒子の流動化特性を判断する一つの目安として考えられている。我々の流動化させる粒子は表2に示す通りであり、B粒子に分類されることになるが、D粒子との境界近くにあり興味深い位置関係を持っている。B粒子の流動パターンについては次のように言われている。すなわち、均一流動化状態が存在せず、気泡流動状態において気泡にクラウドが形成され、また、塔径によりスラグ流動状態もみられる。さらに、このB粒子は塔内の粒子挙動も激しく、乱流流動状態に移行する時、大きな塔内圧力変動や不安定流動を見せるという特徴を持つ[2]。このような流動パターンの傾向は、我々の粒子において確かに観察された。この観察も、二次元モデルが流動層としての特性に大きなずれをもたらさないという点の傍証と考えられる。

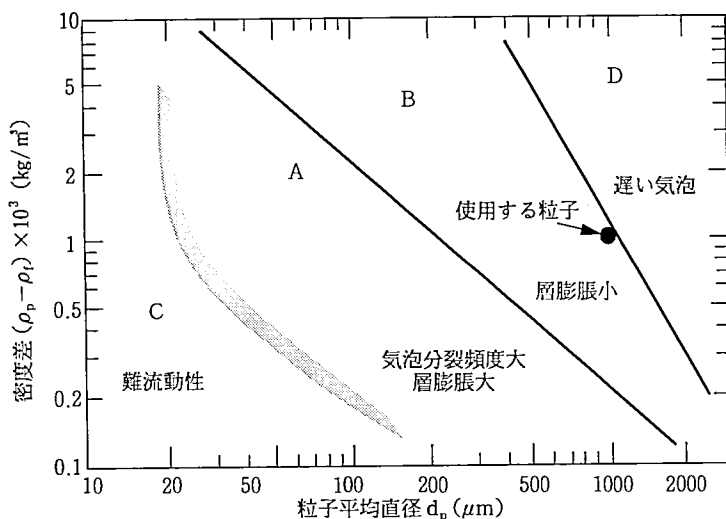


図7：粒子直径と密度による粒子の流動パターンの分類([2]より引用)

6. 4. 流動状態の観察

本装置により様々な流動状態を観察でき、興味深い状態を撮影できた。ここにその一例を示し、説明する。

図8に示すのは、 $h_T = 200\text{mm}$ (写真A, B-2, D) と、 $h_T = 400\text{mm}$ (写真B-1, C) において観察された典型的な状態の写真である。

(A)は流動化開始状態であり、状態としては充填時と変化はないが層の表面において粒子が飛び跳ねたり、また層内部において粒子が動きはじめている状態である。この状態において充填層高が高くなると10~20mm程度の層膨脹を起こす。

(B)は、徐々に流速を上げていくと層内に気泡が発生する状態にある。これが気泡流動

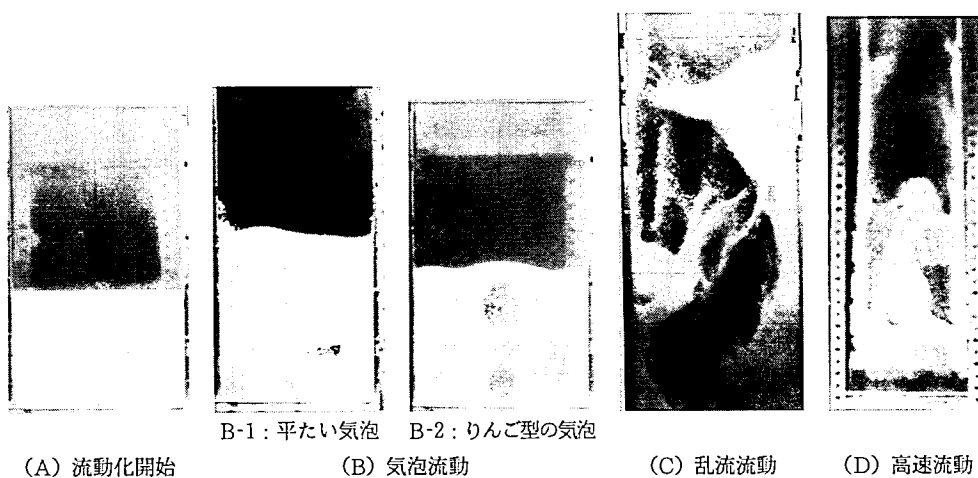
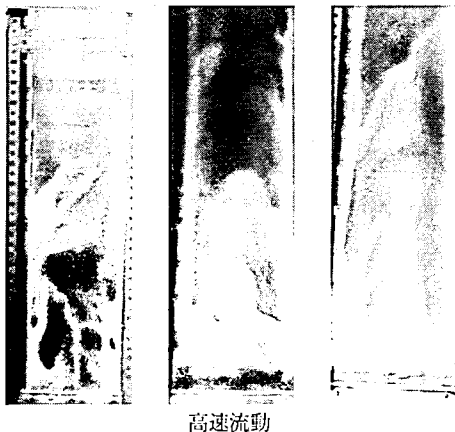
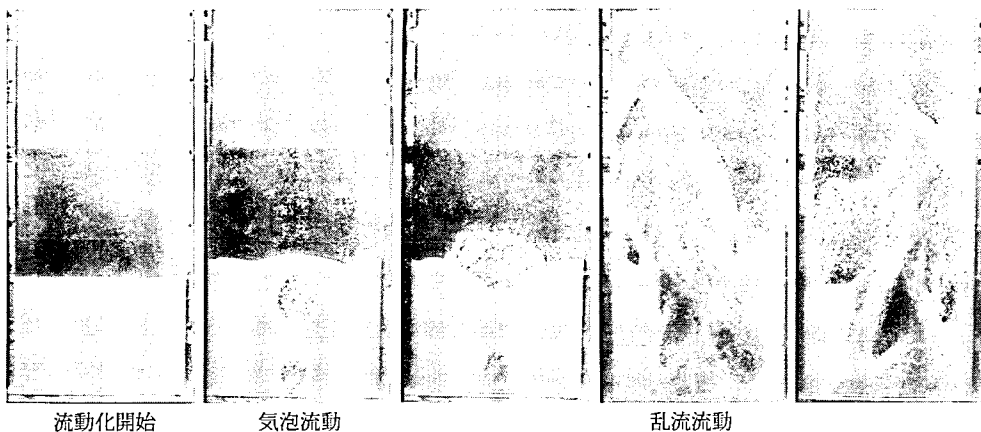


図8：観察された流動状態

である。しかし、充填層高が150mm以下の条件では明確な気泡は発生していない。また多くの場合、連続写真(図9、10)を見ても分かるように、気泡は層内に単一気泡として発生している。気泡の形は押しつぶされて平たくなっているもの(図8. B-1)と、気泡底部が盛り上がったりんご型のもの(図8. B-2)が観察された。前者は気泡発生時の初期状態と充填層の底部で観察され、後者は流速・塔内圧力の増加に伴い観察されている。

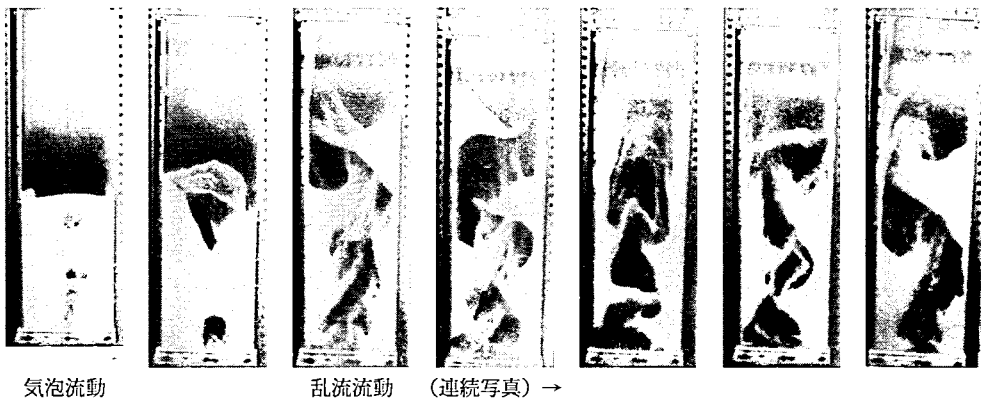
また、この装置では、気泡の発生が見られるとほぼ同時に(C)の乱流流動に遷移してしまう場合が多く、気泡流動状態の維持は非常に困難であった。これは気泡の上昇速度や発生周期、また空塔速度に大きく影響していると考えられ、今後の調査により詳細を解明していきたい。乱流流動では層の中央部に「く」の字形の空気流路が形成され、粒子群はその左右の固気界面に鋸歯状の面を形成し流動する。この形状が海上の波の進行に似ていることから、「波頭」と呼ばれている[2]。波頭は、気流に上方に押し上げられながら成長するが、中央を流れる気流により粒子を奪われ崩壊して行く。このとき、反対壁面に集積される粒子と気流に沿って流されてしまう粒子に分離される。この集積された粒子により、反対壁面に新たな波頭が形成される。後述する連続写真が、この現象の遷移を捕らえている。

更に流速を増やすと、(D)の高速流動状態になり、圧力変動は乱流流動に比べて小さ



カメラ: NIKON F4
撮影条件: シャッタースピード F1/8000秒
フィルム: FUJI NeoPAN 400

図9: 充填層高 $h_T = 200\text{mm}$ における流動状態の連続写真
(写真間隔 3 コマ/秒)



カメラ：NIKON F4
 撮影条件：シャッタースピード1/8000秒
 フィルム：FUJI NeoPAN 400

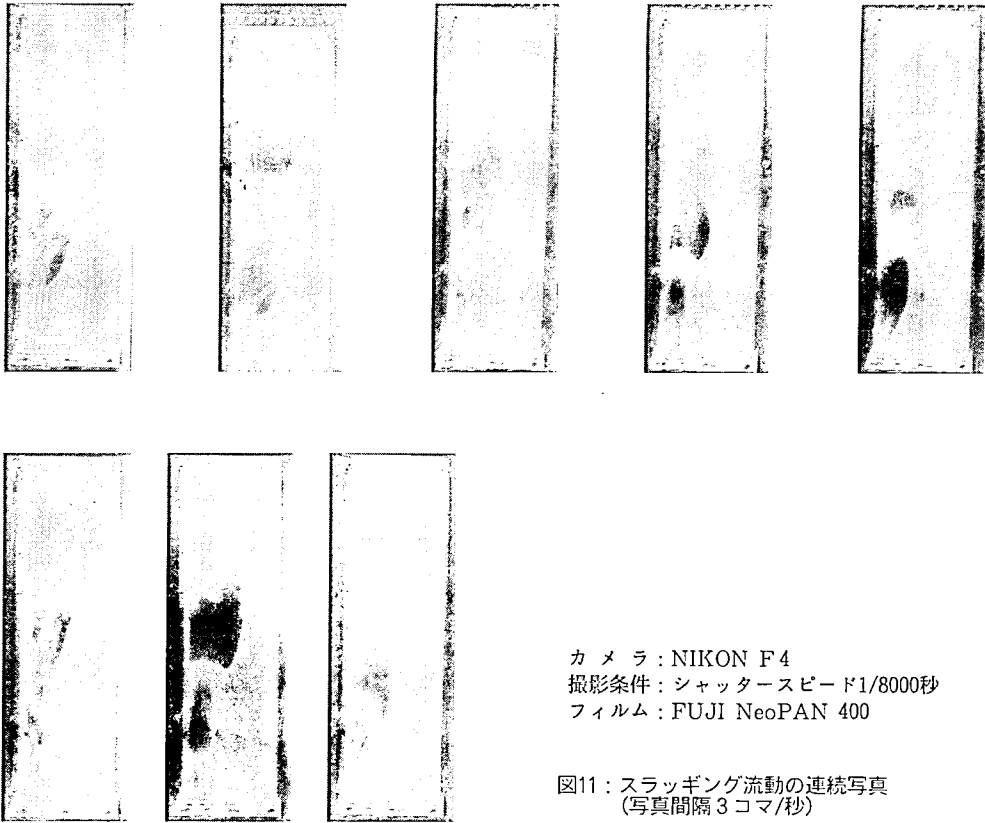
図10：充填層高 $h_T = 400\text{mm}$ における流動状態の連続写真
 (写真間隔 3 コマ/秒)

くなる。この状態では粒子は層を形成できず、塔内部全体において粒子は浮遊している。このとき、塔中央部に大きく形成される粒子の上昇領域と左右壁面近寄に形成される降下領域を明確に区別できる。浮遊領域内部の構造で注目すべき現象として、これら二つの領域の境界において粒子の相対的な速度差により、境界上に渦状に粒子が動く部分が形成される現象があげられる。この渦状の粒子運動により、これらの領域間の粒子の交換が行われていると考えられる。

また、図9と図10は充填層高 $h_T = 200\text{mm}$ 及び 400mm における連続写真である。これらは、それぞれの現象に対して、図に示す条件で連続的に撮影を行っており、特に乱流流動に注目して撮影を行った。乱流流動では、鉛直方向への挙動が充填層高によって大きな違いがあることが見られた。また、先に述べた「波頭」の成長から崩壊に至る過程も捕らえている。

気泡流動状態の後、スラッシング流動状態(図1参照)が発生する場合がある。これは、気泡流動状態の気泡に比べて気泡径が大きく、塔径に近い直径を持つ気泡が単一で上昇する状態であり、塔径が小さい場合に起きやすい現象である。本実験装置においても、充填層高さは 600mm において、この状態を偶然観察でき、写真撮影を行うことができた。この状態の連続写真を図11に示す。大型の気泡が塔の横幅全体に広がり上昇していく様子が分かる。

このように観察された状態は、全体的に見ると Geldart-map (図7) により予測され



カメラ：NIKON F4
 撮影条件：シャッタースピード1/8000秒
 フィルム：FUJI NeoPAN 400

図11：スラッキング流動の連続写真
 (写真間隔3コマ/秒)

る状況に近い。

これらの観察により、今後の研究課題、すなわち、気泡流動の安定したコントロール方法の創案、乱流流動に関して内部の構造の解明、流動及び圧力変動の特性など、に対して有効と考えられる多くの情報を取得できた。

7. 結 語

流動層モデル試験装置を製作し、予備的な実験を行った。これにより基本的な流動状態の観察と確認ができ、二次元化流動層の妥当性を確認できた。今後、本装置によりさらに詳しく研究を行う予定である。

8. 謝 辞

本研究は平成8年度の卒業研究より始められたものであり、精力的に研究を行ってくれた当時の卒研生諸君、新井直也君と吉田豪君に感謝します。

付録1 記号

Ar	アルキメデス数	P_T^*	無次元圧力
C_D	抗力係数	P_m	自重圧力
D_p	粒子代表直径	Rep	粒子レイノルズ数

F_g	重力	U_0	粒子の終端速度
F_D	抗力	U_T	空塔速度
h_T	充填層高	U_T^*	無次元速度
ΔP_T	塔内差圧	ρ_f	空気密度
ΔP_{TS}	流動化開始時の塔内差圧	ρ_p	粒子代表密度
ΔP_{TB}	気泡流動時の塔内差圧	ν_f	空気の動粘性係数
ΔP_{TC}	乱流流動時の塔内差圧	μ_f	空気の粘性係数

付録2 引用文献

- [1]千葉、吉田編著、流動層概論、朝倉書店、1997
- [2]化学工学会編、化学工学の進歩26・流動層、槇書店、1992
- [3]鞭、森、堀尾、流動層の反応工学、培風館、1984
- [4]山口、緒方、機械工学科流体工学研究室「変動流に関する画像と変動量データの同期取得および解析システム（略称ISODAS）」の報告、明星大学理工学部研究紀要、No.33（1997. 3）p. 63-70