



Title	気固系流動層における圧力分布と気泡の発生・成長の関係について
Author(s)	鈴木, 翼; SUZUKI, Akira; 三木, 正之 他
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 28(4), 220-230
Issue Date	1977-11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/23623
Type	departmental bulletin paper
File Information	28(4)_P220-230.pdf



気固系流動層における圧力分布と気泡の発生・成長の関係について

鈴木 翼*・三木 正之*

The Pressure of a Single Rising Bubble in Gas-Fluidized Bed

Akira SUZUKI* and Masayuki MIKI*

Abstract

The pressure of a gas-bubble, which was formed by injection of pulse air through a nozzle installed at the bottom of two-dimensional fluidized bed, was measured with a semi-conductor type pressure transducer. The experimental variables were, combinations of steady superficial air velocity (u_0), and injection time of pulse air (T). The results were as follows:

(1) When u_0 was over a critical value of 7.7 cm/sec (75% of incipient fluidization velocity, u_{mf}), a minimum pressure that was less than the base line pressure by steady air flow, was always observed after a bubble passed a measuring point (Figs. 2, 5-8).

(2) The bubble pressure was mainly dependent upon u_0 , the position of the bubble and, to a lesser degree, the size of the bubble (Figs. 13-15).

(3) The pressure region, in which a bubble could exist, is shown in Fig. 16. The maximum bubble pressure observed was in good agreement with the pressure at incipient fluidization (P_{mf}), although the minimum varied with the vertical position of bubble. In the upper part of the bed the pressure region ranged between 75% and 100% of P_{mf} , and in the lower part it was wider, and particularly at the bottom of the bed the minimum pressure was 65% of P_{mf} .

結 言

流動層技術は触媒接触反応、固体反応などに主として利用され¹⁾²⁾、その粒子混合の良好さとそれに伴う層内温度分布の均一性のため、化学工学的単位操作の中の比較的新しい技術として重要な位置を占めるに至っている。さらに近年環境汚染問題を解決するための手法が各種模索されている中で、固形廃棄物の処理³⁾や気相および液相からの溶質の吸着操作³⁾に対し、その利用が注目され、次第に実用化の方向へと向っている。

気固系流動層装置は粉体層の下部から気体を上方へ流し、層内に多数の気泡を発生させ、この気泡により粒子の混合と気体および固体の接触が同時に促進されることに最大の特長がある。しかし気泡の体積があまり大きすぎると slugging の原因となり、流体と粒子の接触に悪影響を及ぼすと言われている。したがって理想的な流動層とは層内を適当な大きさをもった気泡が均一な状態で上昇してゆくのが望ましいとされており、流動層操作にとって発生気泡状態の制御はその設計と最適操作条件にとって最も重要な課題である。

* 北海道大学水産学部化学工学講座
(Laboratory of Chemical Engineering, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

流動層に関してはこれまでも多数の研究が行なわれているが、層内圧力分布と気泡の挙動の関係については2, 3の測定例⁽⁴⁾⁽⁵⁾が報告されているのみである。そこで本研究は層内圧力分布の時間的変化の測定から気泡の発生・成長機構の一端を解明し、流動層の最適な設計・操作条件を見出すための基礎的研究を主目的として、気固系二次元流動層を用い、パルス空気流によって単一気泡を発生させ、その生成時および上昇時の層内圧力分布を応答の速い圧力変換器により測定し、その結果からいくつかの有用な知見を得たので報告する。

実験装置および実験方法

実験装置の概略をブロック線図で示したのが図1である。流動層本体は内法で高さ500 mm, 幅150 mm, 奥行10 mmの透明アクリル樹脂製二次元流動層である。この中に直径約0.3 mmのガラス球を650 g 充てんし、流動層を形成した。自然充てん時の層高は約300 mmで、層上端は大気に開放した。流動層の下部には流動化ガスを層全体に様に流すため、直径約0.5 mmのガラス球を50 mmの高さに充てんし、その上下を多孔板で固定した整流器をとりつけた。流動ガスとしては空気を使用した。図中のコンプレッサー(1)は様に空気流を流すためのもので、減圧弁によって任意の流量に調節でき、その流量はオリフィス流量計によって測定した。これによって送られる空気は整流器を通過し流動層に入り、様に速度で層中を上昇して大気へと放出される。またコンプレッサー(2)はパルス状の空気流を層底部にとりつけたノズルより圧入するための空気源で、充分な容量をもち、かつ常に一定圧力(1 Kg/cm² gauge)に保たれている。タイマーから送られる電気信号は周期的に一定時間

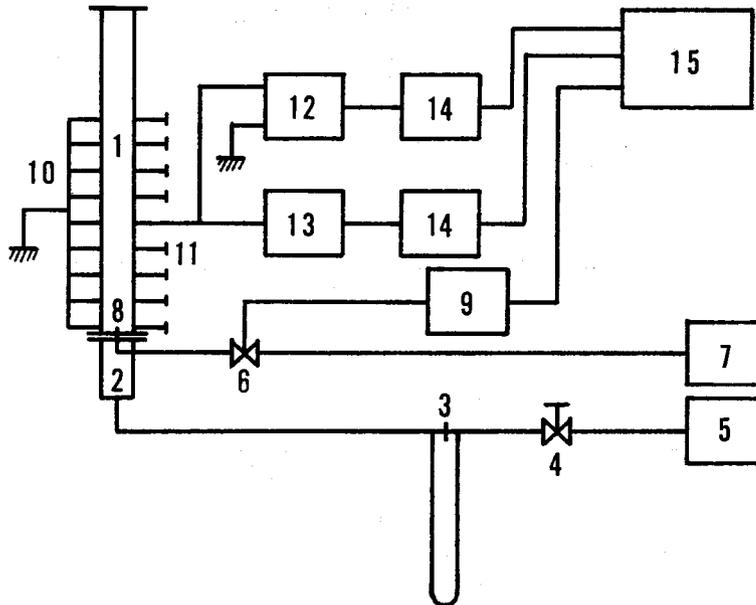


Fig. 1. Block diagram of apparatus

- | | | |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 1. two-dimensional fluidized bed | 2. gas distributor | 3. orifice meter |
| 4. flow regulating valve | 5. compressor 1. | 6. nozzle for pulse air injection |
| 7. solenoid valve | 8. compressor 2 | 9. electrical timer & relay circuit |
| 10. electrode | 11. pressure tap or electrode | 12. capacitometer |
| 13. pressure transducer | 14. d.c. amplifier | 15. pen-writing oscillograph |

(ダイヤルにより設定) 電磁弁を開き、流動層下端中央のノズルからパルス状の空気流を直接層中へ吹きこみ、単一気泡を発生させるようになっている。

流動層内の圧力の検出は層壁面にとりつけた圧力タップを通して半導体型圧力変換器(固有振動数 10 kHz 以上)により行ない、その出力電圧を直流増幅器を通しペン書きオシログラフまたは X-Y レコーダに記録させた。圧力タップは市販の注射針を利用し、これを流動層壁面の中心線上一列に 37.5 mm 間かくで 8 本とりつけ、圧力変換器との連絡には内径約 2 mm のシリコンゴム製の管を用いた。

気泡の位置の検出は電気容量法によった。そのための電極は圧力タップに用いた注射針を兼用させ、対電極はそれと対向した位置に銅製の小さな極板を設けた。この電極を電気容量計に接続し、直流増幅器を通して、ペン書きオシログラフまたは X-Y レコーダにその信号波形を前述した圧力波形と同時に記録させた。

実験結果および考察

気泡の発生および上昇に伴う層内圧力の時間的变化

図 2 は流動層に流動化開始速度 ($u_{mf}=10.3$ cm/sec) よりわずかに小さな流速で連続的に空気を流しておき、流動層底部のノズルから 0.1 秒間パルス状に別な空気流を吹きこんだとき、層の下から 18 cm の位置で同時に観測された極板間電気容量と圧力の時間的变化を示す波形の一例である。この図の上方の曲線 (1) は観測点における電気容量の変化を表わしており、空気に比較してガラスの誘電率は大きいので、電極間の空間率が增加すれば電気容量は減少し、気泡の通過および層の膨張の程度を検知することができる。また図の下方の曲線 (2) は観測点における静圧の時間的变化を示すものである。

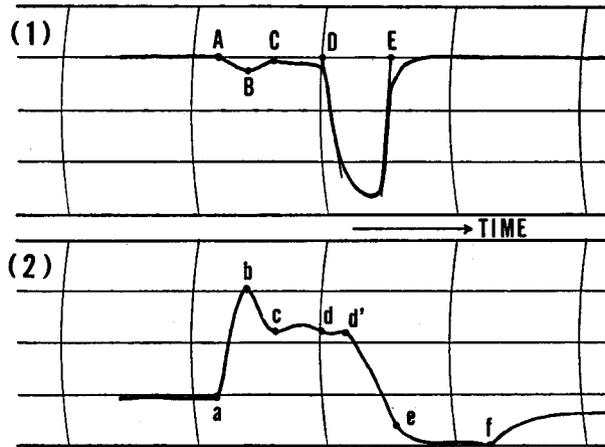


Fig. 2. Recorded chart of porosity (1) and pressure (2) by pen-writing oscillograph.

図の A 点においてノズルからの空気吹きこみが開始され、それと同時に層は膨張し始め、B 点に至り層内の空間率は極大に達している。B 点はパルス空気流の吹きこみ終了時に一致している。その間 (a~b) 層内圧力は急激に増大し、b 点においてやはり最大に達している。吹きこみが終了すると層内圧力は減少を始め、一方粒子層も収縮に向っている。c 点において圧力は極小値を示し、この時粒子

層空間率はパルス空気流吹きこみ前の値よりやや大きな値にもどり、以後この状態が気泡が測定点を通過するまで続く。すなわちこの時の空間率は流動時の濃厚相の空間率、いわゆる ϵ_{mf} と見なすことができる。C 点に至って層内の空間率および圧力は安定し、本実験では直接確認することはできなかったが、この時気泡がノズルを離れ、上昇を開始するものと思われる。この例では気泡の生成に要した時間 (a~c) は約 0.2 秒である。上昇を開始した気泡はその時の条件 (定常空気流量およびパルス空気吹きこみ時間) によって各種の挙動をとるが、その詳細については後述する。

図の D 点において気泡の先端は観測点に到達し、その場所の空間率がほとんど 1 になるため、曲線 (1) は急激な変化を示している。Reuter⁴⁾ によれば気泡内の圧力はほぼ一定であるとの測定例を得ており、気泡がほぼ等速で上昇しているとすれば静止点で測定される気泡内圧力-時間曲線は直線になる。この図で見られる直線部分は d'~e 間にあたり、Reuter の実験を裏づけている。しかし本図の圧力曲線と空間率曲線を比較してみると、気泡の後端が圧力タップを離れる E(e) 点はよく一致しているが、気泡の先端が圧力タップに突入する点は、空間率の変化から見た場合は d 点になり、Reuter による圧力曲線の直線部分から推定すると d' 点となり、この両者の間にずれが見られる。液中の気泡と異なり、気固系の気泡は濃厚相と希薄相の間に本来明確な境界面が存在するとは言えず、また気泡内およびその周囲における気体の流れ¹⁾ も複雑であるので、厳密にいずれを気泡先端かは決定することは本実験では不可能であった。

e 点以降は気泡が圧力タップを通過した後、すなわち気泡より下方において次第に気泡が離れてゆく時の濃厚相の圧力変化である。気泡が圧力タップを離れても、圧力は直ちに元の値には復帰せず、f 点までゆるやかに減少を続けており、気泡のかなり下方まで気泡内と同様なガスの流れが行なわれていることを示唆している。しかし、 u_0 を小さくすると後に述べるように定常圧力より低い圧力を示す現象は起こらず、 u_0 のある値を限界として気泡近傍のガスの流れに変化が見られることがわかった。f 点以降は観測点の空気の流れが気泡の影響から脱し、元の定常空気流によって生ずる圧力値への復帰段階であり、特に目立った変化は見られない。

単一気泡上昇時の層内圧力分布

図 3 は単一気泡の発生から消滅に至る間の層内圧力分布を測定した結果である。実験条件は流動層に空筒速度 $u_0=4.8$ cm/sec (u_{mf} の 47%) という低い流速で定常空気流を供給しておいた状態で、パルス空気流を 0.3 秒間層底のノズルから層内に圧入して気泡を発生させ、以後の層内圧力変化を壁面の高さ方向に 8 個とりつけた圧力タップにおいて測定したものである。なお便宜上、圧力タップには層下方から順に 1 から 8 まで番号をつけ、以下では層の高さ方向の位置を表すのにタップ番号を用いることにする。それぞれのタップの位置はタップ 1 が整流板上 3 cm、タップ 2 がその 3.75 cm 上、以下は 3.75 cm の等間かくでタップがとりつけられている。したがってタップ 8 は整流板上 29.3 cm の位置にあたる。

図中の実線はこの流動層が流動化開始状態にある時の層内圧力分布を表わしたものである。パルス流を吹きこみ始めてから 0.1 秒後においては層内の圧力分布は吹きこみ前に比べて大きな変化を示していないが、タップ 2 付近 (整流板から 6.75 cm 上方) の圧力のみが大きく増加し、層内で最も高い圧力となっている。このことはノズルから吹きこまれた高速気流が細いジェット状となって粒子を押しつけて噴出し、整流板よりやや上方で空間を押し拡げているため、その空間では流速が小さくなり、静圧が上昇し、またその下方は細い高速気流となっているため、低い静圧を示していると想像される。この空間が生成している様子は図 4 に示した写真からも実際に確認できる。なおこの写真は流動層の裏面より一定時間間かくで発光させたストロボの通過光により、カメラのシャッターを開放しておいた状態で撮影したものである。

$t=0.30$ 秒の線はちょうどパルス空気流の吹きこみが完了した時点の圧力分布を表わしており、こ

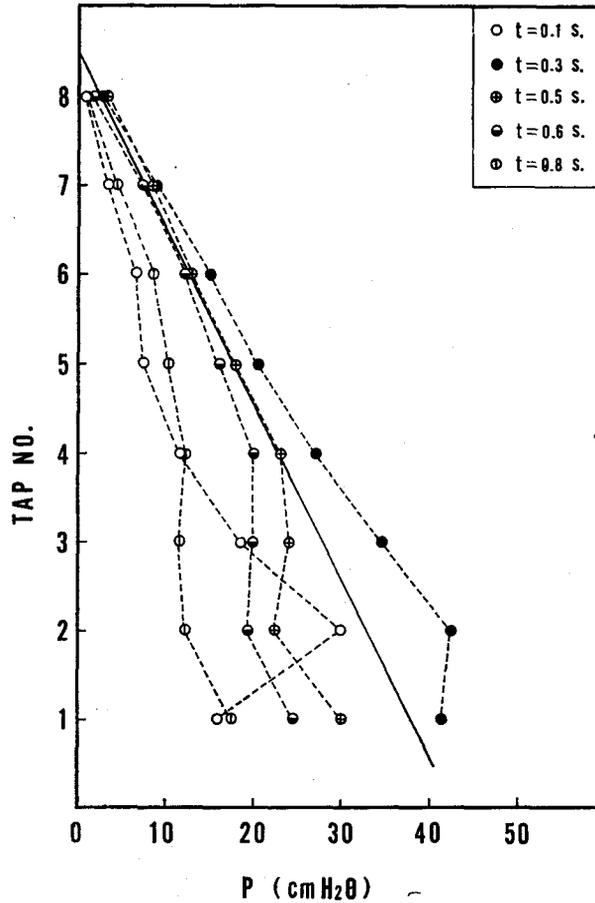


Fig. 3. Change of pressure distribution with a single rising bubble.

の時層内の圧力は最大となる。そしてタップ2より上方において圧力はほぼ直線的に変化し、しかも流動化開始時の圧力より20~30%高い圧力を示している。これはタップ1および2の間の圧力がほぼ等しいことから、粒子の存在しない空間、すなわち気泡が整流板からタップ2付近まで発達し、その上方では吹きこまれた空気が一定速度で粒子間を上昇しており、その流速は流動化開始速度よりわずかに大きい、瞬間的な現象のため空気抵抗による力は粒子層の Bridging および壁面とのマサツ力により支えられ、固定層として止まっていると見られる。吹きこみが終了すると層内の圧力は下降を始め、気泡より上方ではほぼ流動化開始圧力に等しい分布をとる。本図の実験条件は定常空気流量が流動化開始速度の約半分と非常に小さいため、発生した気泡は安定した上昇を続けられず、層の途中で消滅した。したがって $t=0.6$ 秒においてはすでに層内の圧力は流動化開始時の状態より下がっており、気泡は粒子層に押しつぶされ収縮を始めている。 $t=0.8$ 秒において気泡は消滅し、層内の圧力状態もほぼ定常流によるものにもどった。

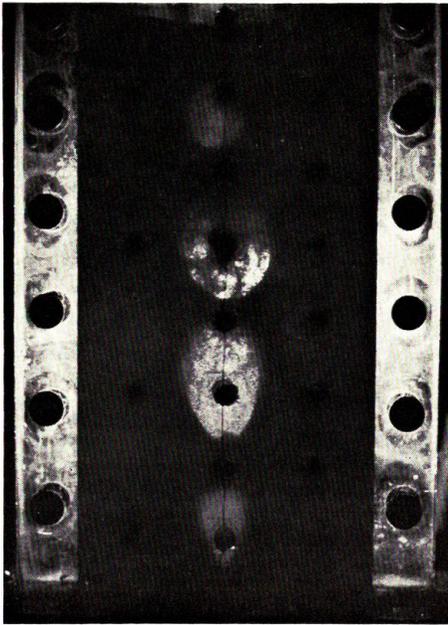
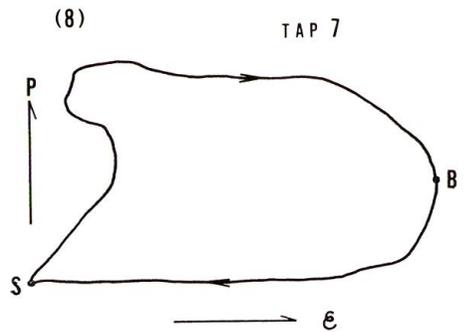
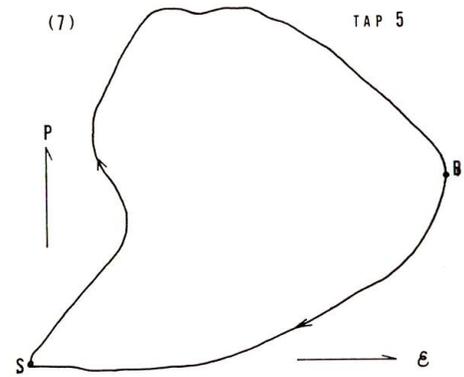
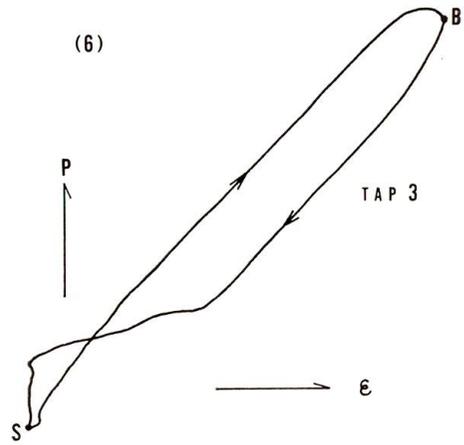
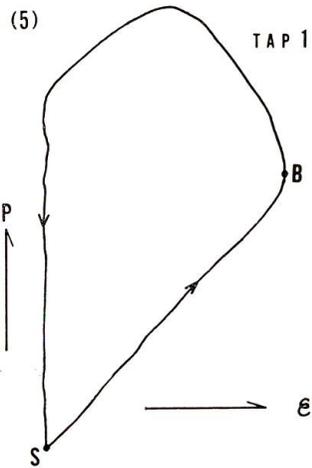
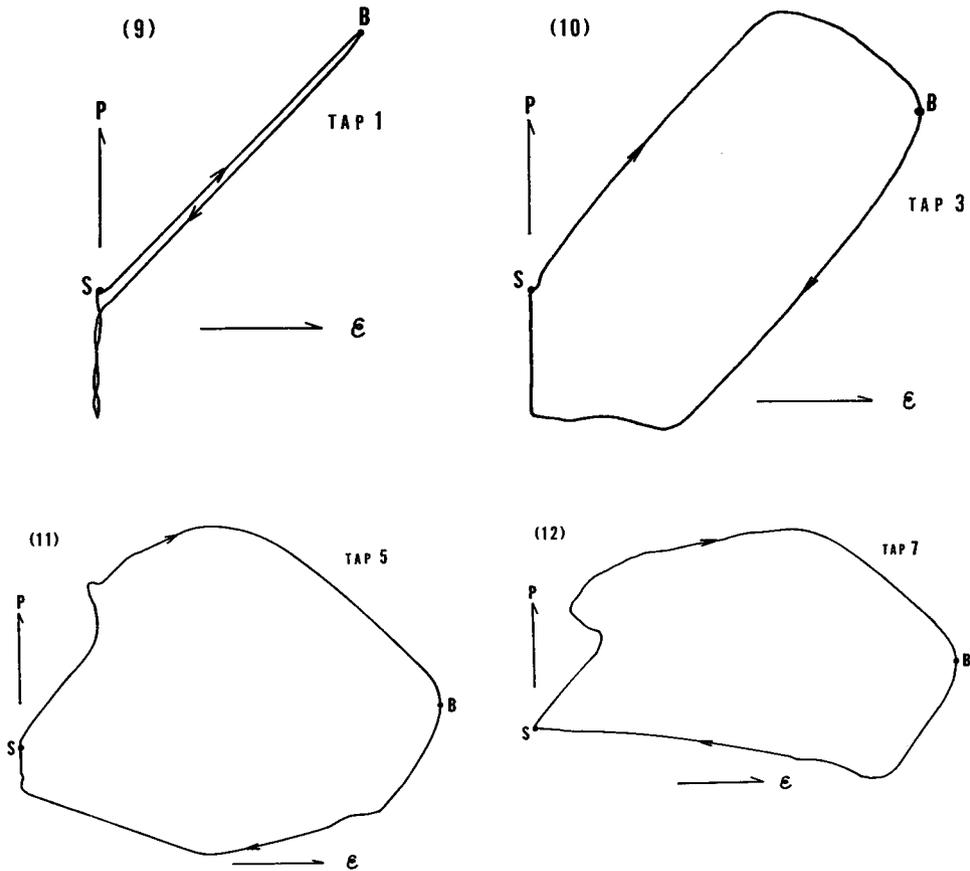


Fig. 4. Photograph of bubble rising.



Figs. 5-8. Recorded charts of porosity and pressure by X-Y recorder ($u_0 = 6.76$ cm/sec, $T = 0.1$ sec).



Figs. 9-12. Recorded charts of porosity and pressure by X-Y recorder ($u_0=8.69$ cm/sec, $T=0.1$ sec).

層内気泡圧力の分布

気泡圧力の測定は前述したように観測点における空間率が最大（電気容量が最小）に達した時の圧力から求めた。記録は X-Y レコーダを用い、同一観測点における電気容量信号を X 軸、圧力信号を Y 軸に入力し、それから得られた図形（図 5~12）から読みとった。各図の S 点はパルス空気流圧入前の状態を示し、B 点が空間率最大になった時点、すなわち気泡の中心が観測点に一致した時点を示している。図 5~8 は定常空気流速 $u_0=6.76$ cm/sec, パルス吹きこみ時間 $T=0.1$ sec のときのタップ 1, 3, 5 および 7 の各点で観測された図形である。また図 9~12 は $u_0=8.69$ cm/sec, $T=0.1$ sec におけるタップ 1, 3, 5 および 7 の観測図形である。これらの図を比較してみると、最も大きな特徴は u_0 の小さい時（図 5~8）にはパルス空気流吹きこみ前の圧力（S 点）より低い圧力は気泡の通過に伴って観測されないが、 u_0 が大になって u_{mf} に近づくと（図 9~12）、気泡通過後に圧力が S 点におけるものより下がり、それから復帰していることである。この気泡通過後に見られる圧力の極小は、さき

に示した図2のf点にあたり、気泡内と同様なガスの流れがその下方まで行なわれていることを示唆している。そしてこの極小点が現われたのは u_0 が 7.7 cm/sec すなわち u_{mf} の 75% 以上の時で、それ以下ではいかなるパルス吹きこみ時間においても見出されなかった。さらに u_0 が 7.7 cm/sec 以上の場合には流動層全体にわたり、すべてのタップにおいて極小点が現われ、それ以下の流速ではいかなる位置においても観測されなかった。

また描かれた図形は流動層下部（タップ1付近）では u_0 の大小によってかなり異なっており、 u_0 が大な図9では気泡通過時と最大圧が一致しているのに対し、 u_0 が小な図5では気泡通過後に圧力は最大を示しているのは興味深い。しかし、層上部（タップ7付近）になると、どちらの図形（図8および12）も顕著な差はなく、圧力が最大に達した後気泡の通過が見られる。したがって u_0 が大であれば、層下部においては圧力波と空間率波（気泡）は同時に出発し、また u_0 が小であれば空間率波の方が圧力波より早く出発している。いずれにしても圧力波の方が速い速度で進行するので、層上部に至るとどちらの u_0 の場合でも、圧力波のピークの後に空間率波のピークが現われることになり、同じようなパターンが得られる。

このようにして描かれた図形から求めた気泡圧力を示したのが図13、14および15である。これらの図はそれぞれ $T=0.02 \text{ sec}$, 0.05 sec および 0.1 sec の間パルス流を吹きこんで層内に単一気泡を発生させ、上昇中の高さ方向の各位置における気泡圧力を測定した結果である。各図において定常的に流している空気流速はそれぞれ $u_0=5.80, 6.76, 7.72, 8.69$ および 9.65 cm/sec である。

たとえば $T=0.02 \text{ sec}$ (図13) においては、 $u_0=7.72 \text{ cm/sec}$ 以上で気泡は消滅することなく粉体自由表面まで達しているが、 $u_0=6.76 \text{ cm/sec}$ ではタップ4と5の間で消滅し、また $u_0=5.80 \text{ cm/sec}$ で

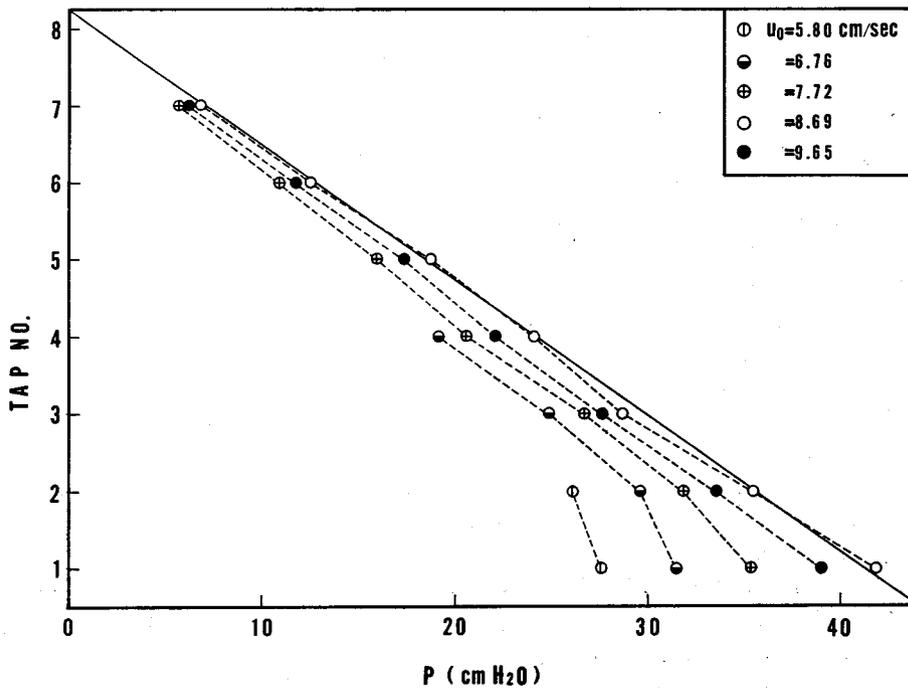


Fig. 13. Change of bubble pressure as it rise ($T=0.02 \text{ sec}$).

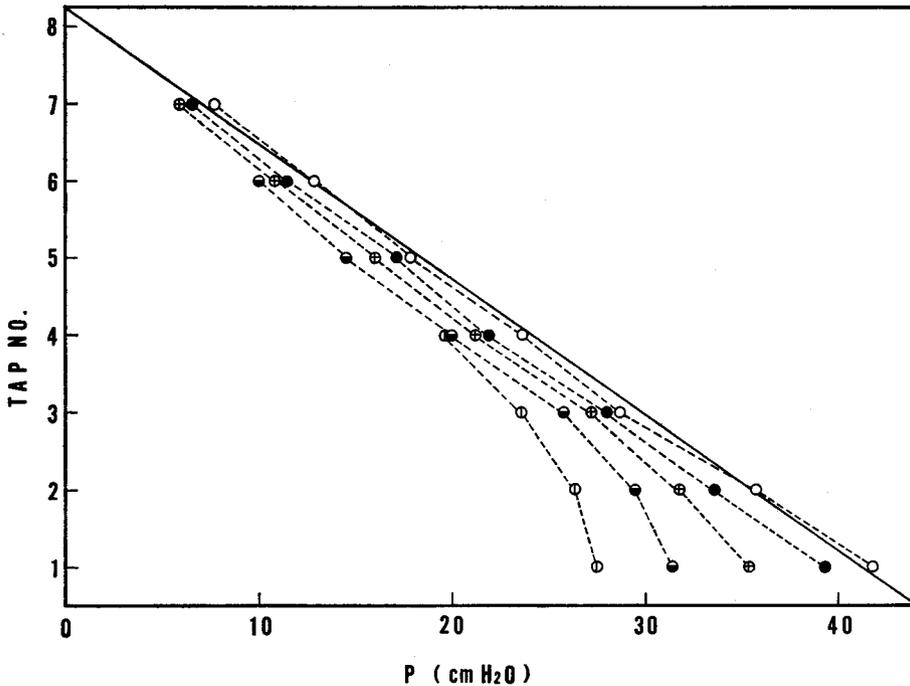


Fig. 14. Change of bubble pressure as it rises ($T=0.05$ sec).

はタップ 2 と 3 の間で消滅している。いずれの場合も 定常空気流速 u_0 の大なるものほど 気泡圧力が大きくなっているのは当然であるが、その圧力は 流動化開始圧力 (実線で示す) を大きくこえることはなかった。すなわち $u_0=9.65$ cm/sec の定常流 (u_{mf} の 94%) に対し、図 13 においては $T=0.02$ sec、図 14 においては 0.05 sec、図 15 においては 0.1 sec と大きくパルス空気吹きこみ量に変化しているにもかかわらず、気泡の圧力はほとんど同じ値をもち、流動化開始時における圧力分布 (実線) に従って変化しているのが認められる。一方、流動化開始速度より定常空気流速が小さくなれば、気泡圧力はそれに応じて低い圧力を示すようになる。しかし吹きこまれたパルス空気の量によってはほとんど圧力に差が現われていない。たとえば $u_0=5.80$ cm/sec (u_{mf} の 56%) について図 13, 14 および 15 の曲線を比較してみると、各位置における気泡圧はほぼ同一の値を示しており、曲線は重ね合わせる事ができる。ただ吹きこみ量の小さな場合は気泡が上昇途中の早期に消滅してしまっているが、消滅寸前においても気泡の圧力はより大きな径の気泡と同じ位置においては一致していることに注目すべきである。すなわちこのことは気泡の大きさとその圧力はほとんど無関係であることを意味しており、気泡の圧力は主としてその位置と定常空気流速、言い換えれば流動層内の圧力勾配によって推定される。

図 16 は図 13, 14 および 15 を一つのグラフにまとめたものである。これによれば流動層内において気泡として存在できる圧力の範囲が図中の直線 (実線) と曲線 (破線) の間の領域として示すことができる。この流動層においては、さらに 2 つの特徴ある部分に分けることができる。タップ 4 付近を境にして、その下方は気泡の最小圧力を示す線は曲線になっており、上方は直線と見なすことができる。一方、気泡の最高圧力はどちらの部分でもほぼ直線で近似でき、これはこの流動層の流動化開始圧力

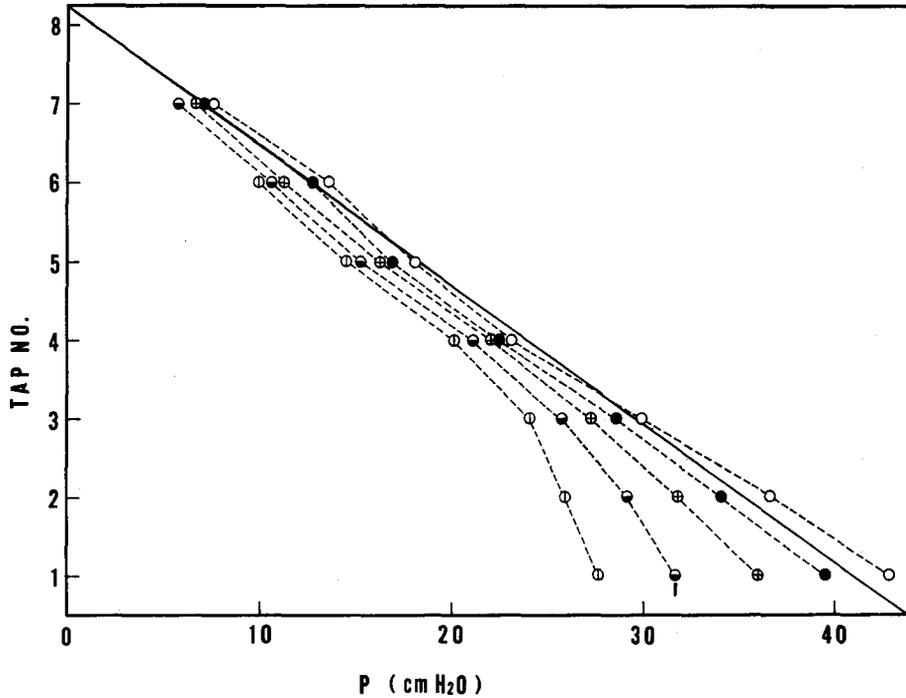


Fig. 15. Change of bubble pressure as it rises ($T=0.10$ sec).

に一致している。流動層上半部においては存在できる気泡の圧力範囲は最高がその位置における流動化開始圧力 P_{mf} であり、最低がその約 75% になっている。この P_{mf} の 75% という最低圧力はちょうど図 9~12 において見られた圧力-空間率図形の圧力極小点が現われる限界値に一致しており、気泡が安定して上昇してゆくために必要な条件を与えていると言える。本実験では確認できなかったが、この圧力以上において初めて一般に報告されているような気泡周囲のガスの流れ¹⁾と wake の発生が開始するものと思われる。

一方、流動層下半部では最高圧力は上半部とほぼ同じであるが、最低圧力は位置により異なり、下へゆくほどその範囲が拡がり、測定された最下部（タップ 1）においては P_{mf} の 65% の圧力をもつ気泡がその下限であった。流動層下部においては強制的に送りこまれた空気によって発生した気泡は定常流量が小さい場合にはその周囲との圧力の差が大きく、急速に空気が気泡から放出されてゆくために、たとえ自身が上昇して低い圧力の場で周囲と圧力の平衡を保とうとしても、その上昇速度はほぼ気泡径によって決まっているから¹⁾、気泡体積は縮小を続けることになると考えられる。層の下部では気泡はその周囲と強い非平衡状態にあり、その体積および圧力の変化は激しく、層上部では比較的周囲と平衡に近く、気泡が安定して上昇しているのが観測によっても認められた。

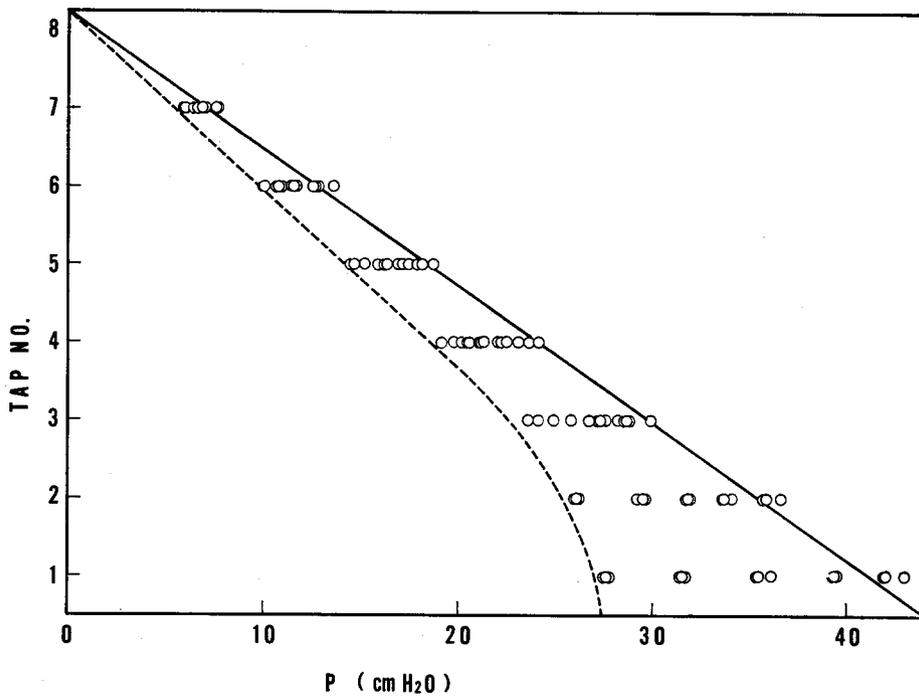


Fig. 16. Pressure region of bubbles in fluidized bed.

文 献

- 1) Kunii, D. and Levenspiel, O. (1969). *Fluidization Engineering*. 534p. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 2) 吉田邦夫 (1976). レビュー“流動層”. 化学工学 40, 653-666.
- 3) 河添邦太郎 (1962). 最近の化学工学, 241p. 丸善, 東京
- 4) Reuter, H. (1973). Druckverteilung um Blasen im Gas-Feststoff-Fließbett. *Chemie-Ing.-Techn.* 35, 98-103.
- 5) 加藤 隆・森 滋勝・榎 巖 (1976). 気系流動層の圧力変動について. 化学工学論文集 2, 109-113.