

微粉流動層における光センサを用いた気泡の測定

羽多野重信

工学研究科・工学部技術部 分析・物質技術系

1. はじめに

流動層¹⁾は、反応装置として種々の化学反応プロセスをはじめ、乾燥・造粒装置や焼成装置、熱交換器などに用いられ、さらに、燃焼装置として石炭燃焼ボイラーや廃棄物焼却炉など様々な工業分野で広く利用されている。流動層は、気固接触、伝熱、混合などに優れていることなどが大きな特徴として挙げられるが、これらの性能は主に装置構造や操作条件によってほぼ決定される。言い換えれば層内部の流動化状態によって左右されるといってよい。また、同じ流動層を用いても流動化媒体である粉体粒子の物性が異なると、流動化状態は同様に大きく異なってくる。したがって、流動化状態を正確に把握することは非常に重要である。

一方、流動化媒体として用いられる粉体粒子は、たとえば、流動層触媒反応プロセスなどでは、微粉の触媒粒子が現実によく用いられている。Geldert²⁾はこれらの微粉を“ A 粒子 ”(平均粒子径 30 ~ 150 μm , 粒子密度 700 ~ 2500 kg/m^3)として分類している。この A 粒子を用いた流動層は一般に微粉流動層と呼ばれている。なお、さらに粒子径が小さい“ C 粒子 ”(平均粒子径 20 ~ 30 μm 以下)を使用した場合、通常の流動化法ではチャンネルと呼ばれる縦方向の細い気流の流路が主に層底部周辺に形成されて、流動化の起こらない領域ができたり、クラックと呼ばれる横方向の亀裂が生じて流動化が起こらない、など正常な流動化が困難となる。

微粉流動層の特徴をまとめると次のようになる。

- 1) 均一流動化領域が $u_{\text{mb}} > u_{\text{mf}}$ の範囲で存在し、層の膨張率は大きい。
- 2) 気泡上昇速度は濃厚層を通過するガスの線速度より速い。
- 3) 気泡は割れやすく絶えず分裂と合体を繰り返しており、通常 10cm 程度以下の平衡気泡径が存在する。
- 4) わずかの気泡の存在で層全体の循環が引き起こされ、濃厚層ガスの逆流が顕著となり、気泡と濃厚層間のガスの交換が速い。

流動層内の粒子や気泡の測定については Morse ら³⁾の電気容量法のように層内にプローブを挿入するものや、X線を用いて層外部からの観測を試みた Grohse ら⁴⁾による研究などに始まり、多くの新しい試み⁵⁻¹³⁾がある。また、これらの測定法をまとめて紹介した報告もある^{14, 15)}。しかし、いずれの方法もプローブの作製や信号処理には高度な知識と技術が要求されたり、あるいは高価な測定装置が必要になるなど、必ずしも一般向きとはいえないのが現状である。さらに、微粉流動層では気泡径が小さく分裂しやすいため、測定例の報告は少ない。

本研究は、比較的安価に入手できる市販の光反射型ファイバースコープおよびセンサを用いることによる微粉流動層内の気泡の簡便な測定法の開発を目的として行った。

2. 気泡の測定方法

気泡測定に用いた流動層は上部が開放されているタイプの流動層であるため、プローブの設置が比較的簡単で半径方向および軸方向のプローブの移動が容易な懸垂型を採用した。ただし、この方法は、層本体が軸方向に長い場合は振動に対する対策が必要である。

2.1 光反射プローブによる気泡測定の原理

本測定で使用したプローブは、市販の光反射型ファイバースコープで、Fig.1 に示すように発光部、受光部共に直径 1mm、被覆部の直径は 2mm となっており、本測定に供するため外径 3mm のステンレスパイプに挿入して使用した。センサは同じメーカー製のもので増幅回路と波形処理回路が内蔵されている。測定装置の構成は、プローブを層内に上下一対として設置し、片方を親機のセンサに接

続き、もう一方を子機のセンサに接続した。ファイバの光源には赤色 LED が用いられている。

流動層内においてプローブ先端に気泡が存在しない場合、Fig.2(a)に示すように発光部から出た光はプローブ先端近傍の粒子層で反射し、強い反射光が受光部に入射する。逆に Fig.2(b)に示すようにプローブ先端に気泡が存在する場合、粒子層までの距離が長くなるため、光の乱反射等により弱い反射光しか入射しない。この反射光の強度の差を利用すると、Fig.3 に示すように気泡の挙動に関する信号を得ることができる。このセンサは受光感度を無段階に調整することができるため、流動化媒体である粉体の変更などにより反射光量が変わった場合にも、常に最適となるようなレンジに調整することが可能である。

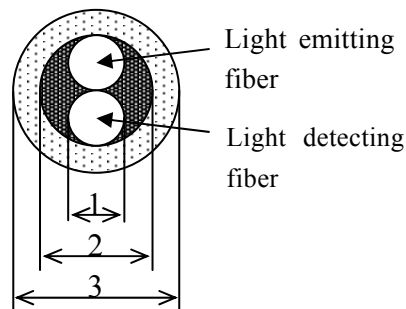
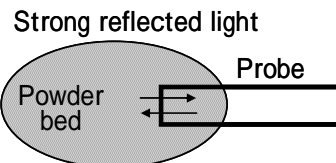
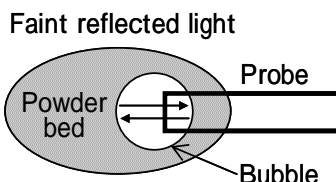


Fig.1 Dimension of optical sensor tip



(a) Bubble is not in existence



(b) Bubble is in existence

Fig.2 Principle of measurement

2.2 波形データの解析方法

本測定法によるデータはパルス波形として得られる。実際に得られた波形をもとに描いた典型的なパターンを Fig.4 に示す。Fig.4(a)のような波形が得られることが理想であるが、そうでないものが数多く検出される。例えば Fig.4(b)のような場合は、気泡が斜めに上昇していったか、もしくは下側のプローブで分裂した気泡の一方が検出されたと考えることができる。また、Fig.4(c)のような場合には、下側の波形では1つの気泡であると判断して良いと思われるが、上側では2つの気泡であると見る

こともできるように、パルスの継続時間にしきい値を設けて気泡か否かの判断をしなければならない。以上のことから気泡解析の基準を次のように定義した。

- 1) 下側のプローブから得られた信号を基準に解析する。
- 2) 気泡の上昇速度を求める場合は、上下共に同じ時間継続した信号のみを採用し、かつ、その信号の前側の立ち上がり部分を利用する。
- 3) 信号の継続時間によりノイズか気泡かのしきい値を設ける。

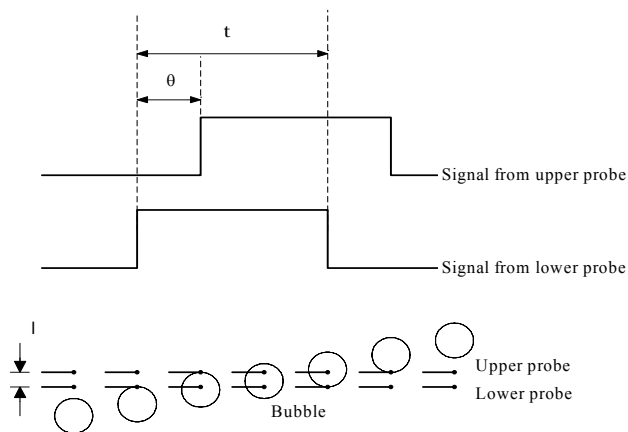


Fig.3 Relationship between change of pulse with passage

2.3 気泡パラメータの算出方法

濃厚相と気泡相の反射光の強度の差から、以下のような気泡の情報を求めることができる。2本のプローブが層内に微小間隔 Δl だけ隔てて上下に設置されている場合、プローブの先端を1つの気泡が通過するとき、両方の検出部からの信号の時間差を $\Delta\theta$ とすれば、気泡の上昇速度 u_b は(1)式のようにして求められる。

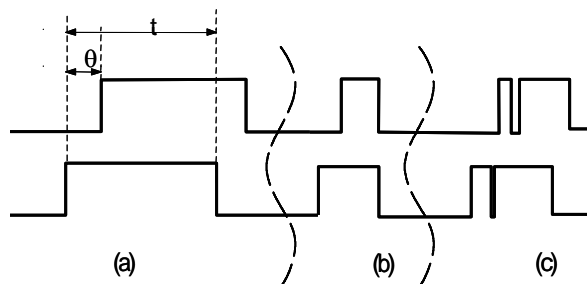


Fig.4 Analysis method of pulse data

$$u_b = \Delta \ell / \Delta \theta \quad (1)$$

測定時間 T において気泡であると確認できるパルス波形の個数を気泡の個数 N_b とおくと、1秒あたり何個の気泡がその地点を通過したかで定義される気泡頻度 f_b は(2)式のように表せる。

$$f_b = N_b / T \quad (2)$$

気泡弦長 λ_b は、気泡内部でプローブの先端がとおった部分の長さで(1)式で求めた気泡上昇速度 u_b と1つの気泡に対する検知時間 t の積で表される。

$$\lambda_b = u_b \times t \quad (3)$$

測定した気泡弦長 λ_b の分布に基づいて真の気泡径を決定するために、ある高さにおいて気泡は直径 D_b の球であるとみなし、気泡弦長 λ_b の N 個の測定値 λ_{bi} ($i = 1, N$) を用いて、次式で体積平均気泡径 D_b 求めることができる。

$$D_b = \frac{3}{2} \left(\sum_{i=1}^N \lambda_{bi}^3 / N \right)^{1/3} \quad (4)$$

しかし、今回の気泡測定方法は、上下一対に設置されたプローブによって気泡の垂直方向の長さのみの測定であるため、気泡を球形物体と考えて垂直方向長さから D_b へ換算する場合、大きな差異が出ることは必至である。そこで、本測定で得られる気泡の垂直方向の測定長さを気泡高さとして定義し、これを h_b と呼ぶことにし次式のように表す。

$$h_b = (3/2)\lambda_{b50} \quad (5)$$

また、流動層内の気泡相の空間率を表す気泡分率 ε_b は次式のようになる。

$$\varepsilon_b = \frac{\text{気泡検知時間}}{\text{測定時間}} \quad (6)$$

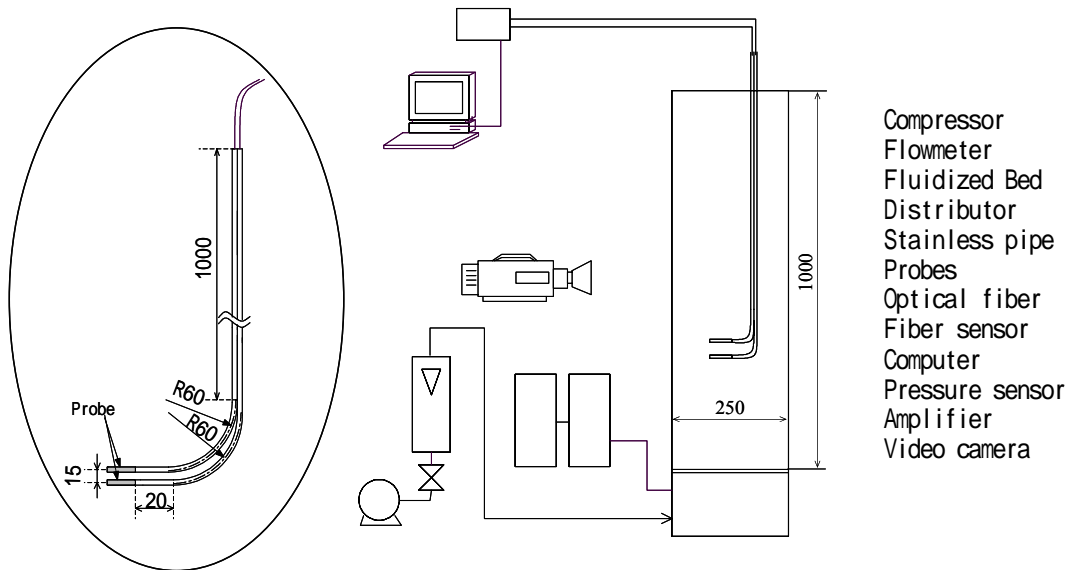


Fig.5 Schematic diagram of bubble measurement in two dimensional fluidized bed

3. しきい値の決定と流動層による気泡測定

ノイズと気泡の分離を行うために、パルス継続時間にしきい値を設定した。しきい値の決定にはビデオ撮影によって求めた二次元流動層内の気泡画像から求めた気泡頻度を用いた。気泡測定の概略は Fig.5 に示すように、流動層は透明アクリル製で、幅 250mm、厚さ 10mm、分散板からの高さ 1000mm である。また、分散板は厚さ 10mm で、20mm 間隔の 10 個のスリットが設けてある。流動化粒子は代表的な A 粒子とされる $51\mu\text{m}$ の F C C 粒子を用いた。

Fig.6 にプローブにより計測されたパルス継続時間と気泡頻度の関係を示す。このグラフ上にビデオ撮影による測定から得られた気泡頻度の値を重ねた。その結果、どの流速においても $0.01 \sim 0.012\text{s}$ の範囲に収まっていることが確認できたため、しきい値、つまり、気泡として認識できるパルス継続時間は 0.01s 以上であると決定できる。

内挿したプローブが気泡頻度に及ぼす影響は、Fig.7 に示すように、ほとんど認められないが、気泡高さに対しては、Fig.8 に示すように、プローブの存在によって 30%程度小さくなっている。これはプローブにより気泡が壊されているものと思われるが、奥行きのない二次元流動層による影響が強く出ているためであり、三次元の流動層においてはさほど影響は大きくなく、10%以下になると考えている。

さらに、三次元流動層において半径方向および高さ方向にプローブを移動させて気泡の測定を行った。用いた流動層は二次元と同様に透明アクリル製で、直径 140mm、分散板からの高さ 900mm、分散板は厚さ 10mm のアクリル板に直径 2mm の穴 26 個を 2cm 正方配列してあり、それぞれの穴には粒子の落下防止と圧損を増加させるために布を貼り付けてある。

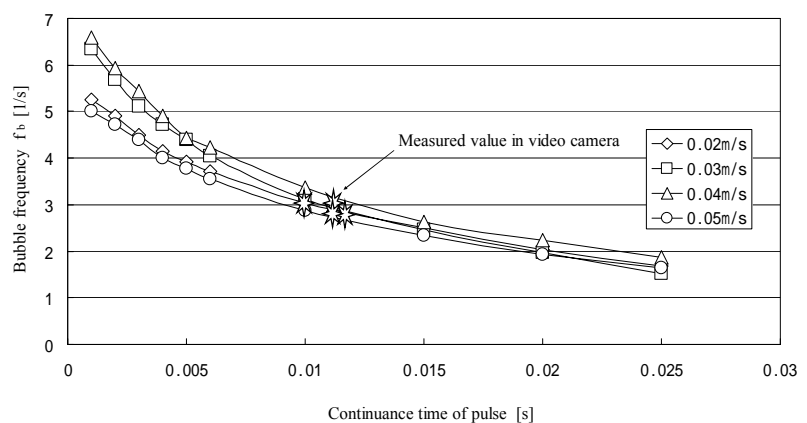


Fig.6 Change of bubble frequency by set up value of pulse

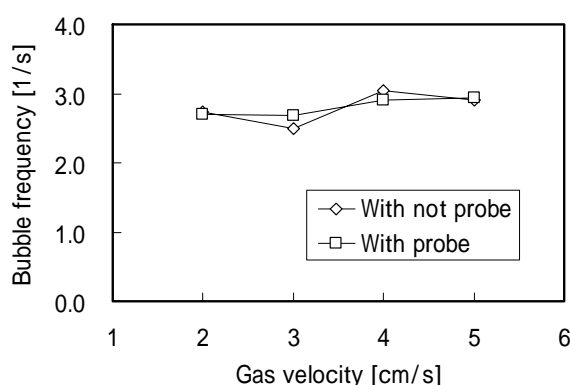


Fig.7 Influence of probe on bubble frequency continuance

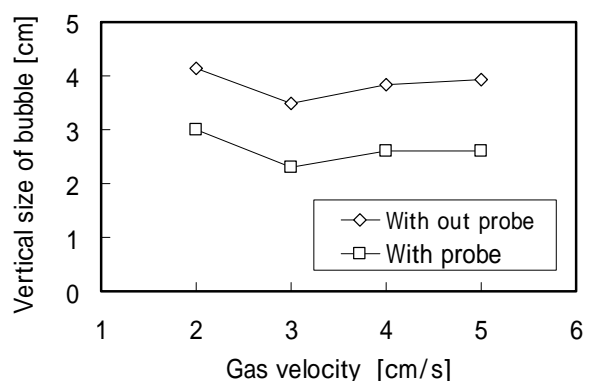


Fig.8 Influence of probe on bubble height tim time and behavior of bubbles

測定結果の一例として、チャー粒子 (50% 径 $70\mu\text{m}$ 、粒子密度 410 kg/m^3) を用いた場合の気泡頻度と気泡高さについて、それぞれ Fig.9 および Fig.10 に示す。これらの結果は、一般に広く知られているように、気泡頻度は層中心部ほど高く気泡高さは層低部を除き半径方法に均一であることが示されている。また、層中心部付近における気泡高さは Fig.11 に示すような分布が得られ、気泡は層上部において成長し大きくなっていることが示されている。

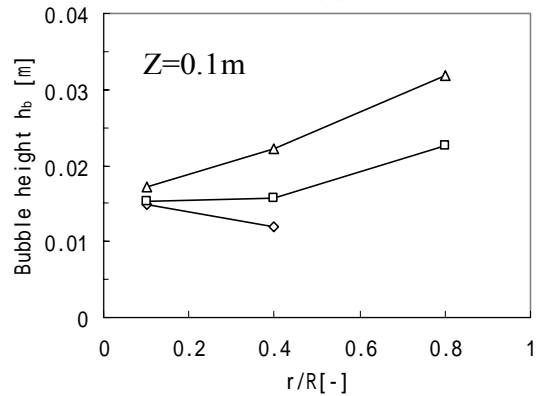
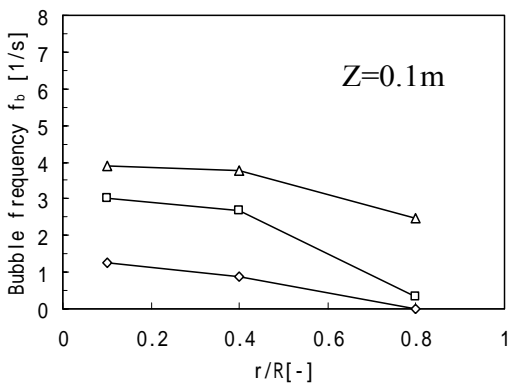
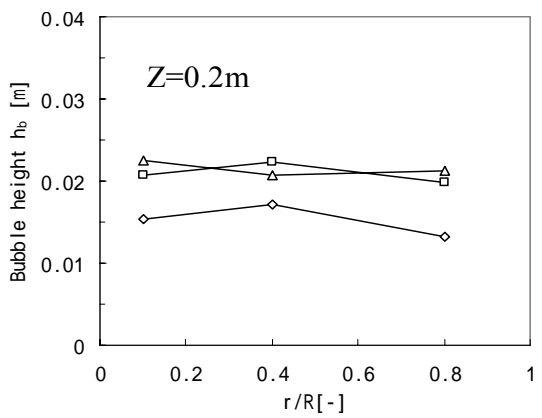
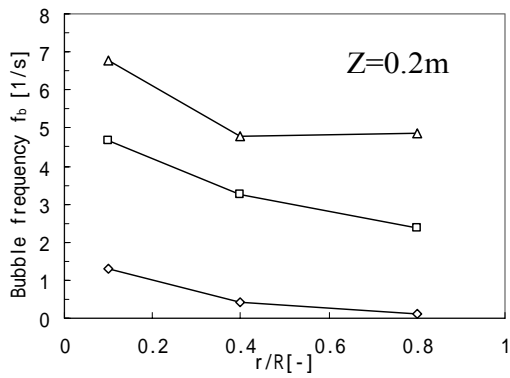
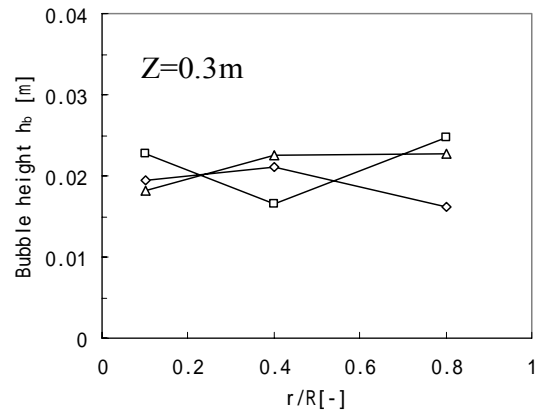
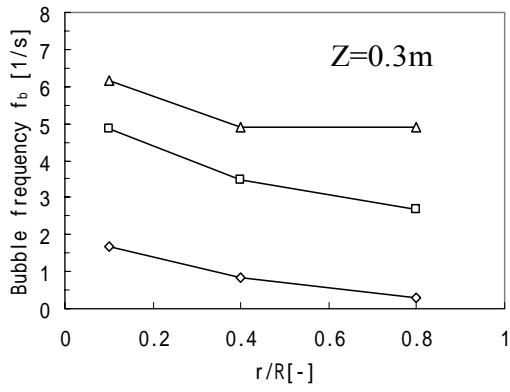


Fig.9 Example for measurement of bubble frequency in three dimensional fluidized bed time and behavior of bubbles

Fig.10 Example for measurement of bubble height in three dimensional fluidized bed

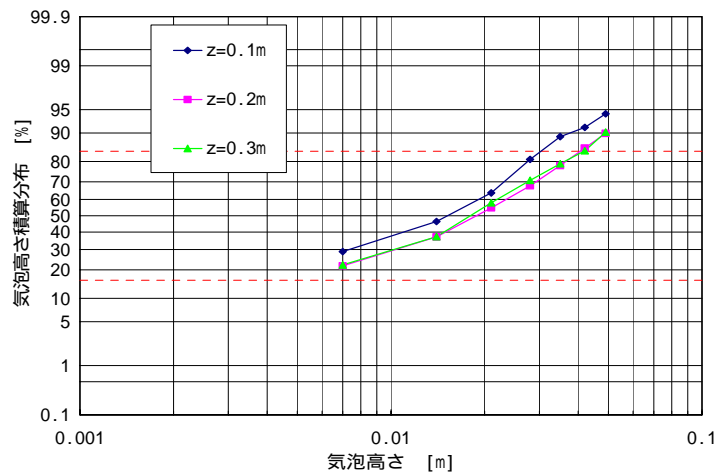


Fig.11 Change of bubble height distribution in three dimensional fluidized bed

4. おわりに

微粉流動層における気泡の測定については、従来、高度な知識と技術が要求され、かつ、高価な測定機器が必要であったが、市販のファイバースコープと光センサを利用することで流動層内の気泡測定が簡便に行える装置を試作した。

二次元流動層、および、三次元流動層を用いて気泡を測定した結果、充分利用可能であることを示すデータを得ることができた。

Nomenclature

D_b	=mean diameter of bubble	[m]
f_b	=frequency of bubble	[1/s]
h_b	=bubble height	[m]
T	=measurement time	[s]
t	=time during which a probe is exposed to a bubble	[s]
u_b	=rise velocity of bubble	[m/s]
N_b	=number of bubble	[-]
$\Delta\theta$	=time difference between bubble pulses detected at lower tip and upper one	[s]
$\Delta\ell$	=distance between lower fiber tip and upper one	[m]
λ_b	=chord length of bubble	[m]
ε_b	=bubble fraction	[-]

Literature cited

- 1) 堀尾正靱, 森 滋勝; 流動層ハンドブック, (1999)
- 2) Geldart, D.; "Types of Gas Fluidization", Powder Technology, 7, 285-292(1973)
- 3) Morse, R.D. and C.O. Ballou; "The Uniformity of Fluidization – Its Measurement and Use", Chemical Engineering Progress, 47, 199-204(1951)
- 4) Grohse, E.W.; "Analysis of Gas – fluidized solid Systems by X-ray Absorption", AIChE Journal, 1, 358-365(1955)
- 5) Yasui, G. and L.N. Johanson; "Characteristics of Gas Pockets in Fluidized Bed", AIChE Journal, 4, 445-452(1958)
- 6) Rowe, P.N. and B.A. Partridge; Trans. Instn. Chem. Engrs., 43, T, 157(1965)
- 7) 大木勝彌, 明島高司, 白井隆; "光学繊維を用いる固体粒子速度の一測定法", 化学工学, 37, 965-967(1973)
- 8) Yamazaki, M. and T. Miyauchi; "Measurement of Temperature in Bubble and Emulsion Phases in Fluid-Bed", Kagaku Kogaku Ronbunshu, 3, 261-265(1977)
- 9) Yamazaki, M., G. Jimbo, T. Matsumoto, A. Mizutani, S. Yogo, H. Shiraya and N. Ito; "A Method for Measurement of Spatial Distribution of Bubbles in a Fluidized Bed", Kagaku Kogaku Ronbunshu, 3, 266-271(1977)
- 10) 白崎, 尾崎, 越後谷; 化学工学協会第 27 年会予稿集, 9(1977)
- 11) Ishida, M., T. Shirai and A. Nishiwaki; "Measurement of the Velocity and Direction of Flow of Solid Particles in a Fluidized Bed", Powder Technology, 27, 1-6(1980)
- 12) Horio, M., A. Nishiyama, J. Liu and I. Muchi; "Horizontal Jet Penetration into Powder Beds under Different Aeration Conditions", Kagaku Kogaku Ronbunshu, 9, 609-616(1983)
- 13) Mii, T., K. Yoshida and D. Kunii, J. Chem. Eng. Japan, 6, 100(1973)
- 14) 堀尾正靱, 千場まゆみ; "流動層における粒子挙動の測定法", ケミカル・エンジニアリング, 30, 781-788(1985)
- 15) 山崎昌男; "流動層における計測と制御", ケミカル・エンジニアリング, 31, 871-880(1986)