

流動層層内における圧力変動に関する研究

加藤 泰生*・宮本 政英*

An Experimental Study on the Pressure Fluctuations in Fluidized-beds

Yasuo KATOH and Masahide MIYAMOTO

Abstract

The behavior of gas bubbles and particles in fluidized-beds which cause the fluctuations of gas velocity, pressure and temperature are significant factors to consider in order to study heat transfer in fluidized-beds. As the first step of investigating the relationship between the interaction of the above factors and the characteristics of heat transfer, an experimental study on the characteristics of pressure fluctuations in fluidized-beds was conducted.

It seemed that the high and low frequency of pressure fluctuations appeared beyond the values of $U_0/U_{mf}=2$. It was found that the frequency of periodic pressure fluctuations depended on the bed height and was not dependent on the superficial gas velocity. These results showed good agreement with Verloop's theoretical results but were higher than Moritomi's experimental results.

1. 緒 言

流動層層内における気泡の発生・成長・破裂等の気泡の挙動、固体粒子の浮遊・攪拌等の流動媒体の挙動などの要因によって、空気の流速・圧力・温度等が激しく変動するため、流動層内の流動・伝熱を考える上でこれらの挙動を詳細に知ることは大きな意味をもつ。

その中でも、圧力変動に関しては特に運転上の装置の維持管理の上からも、かなり大きな問題となる。すなわち、流動層自身の固有の共振周波数に対していわゆる気泡の挙動、粒子の挙動による圧力変動は流動層に対する加振力としての入力と考えられるからである。¹⁾

ところで、圧力変動に関する研究は枚挙にいとまがない^{2)~5)} しかしながら、これらにおいて伝熱特性と関連づけた研究はまったくみあたらない。

本報では、これら要因の相互作用と伝熱特性との関連を見出す第1段階として、流動層内圧力変動の特性について実験的検討を行ったものである。

2. 実験装置および測定方法

実験装置本体は、Fig. 1 に示すように既報⁶⁾⁷⁾ と全く同一のものを使用した。装置は断面積400×400mmの矩形の流路断面を形成し、またキャップ型ディストリビュータをご盤目に配置してある。流動化のための空気は押込型のブロワーを用いて送られ、負荷による脈動を生じさせないように風量を調節してある。 $X_m = 445\text{mm}$ ⁶⁾ の位置と前後100mm離れた位置に伝熱管列(本

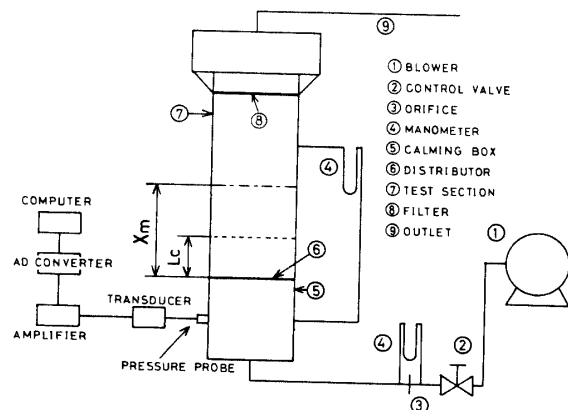


Fig. 1 Experimental set up

* 機械工学科

報では非加熱管)を既報⁷⁾のままに置いてあり、いわゆるフリーバブリング状態の実験とは若干異なる。

圧力変動の測定部は、図中ガス溜部(整流箱, 400×400×400mm)の側板中央のディストリビュータの下方200mmの位置に、市販の圧力センサ・プローブ(共和電業社製, PGM-02KG)をコネクター(自作)を用いて装着した。Fig. 2は、それらプローブとコネクターの部分詳細図である。

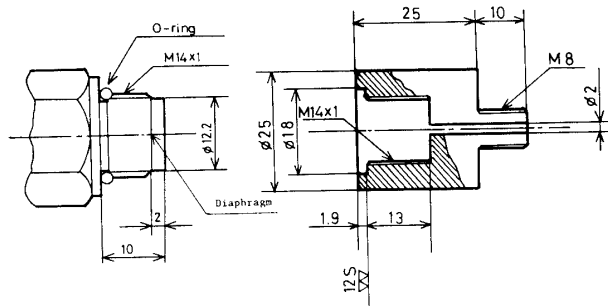


Fig. 2 Schematic diagram of pressure sensor probe and adjuster

圧力変動の電気信号は、動ひずみ測定器、増幅器、AD変換器を通して、一担マイクロコンピュータに蓄えられ、のち加工処理される。データのサンプリング周期は10msec、サンプリング個数は2048個でサンプリングを行い、これらを高速フーリエ変換(FFT)処理して、パワースペクトル分布を求めるなどの周波数解析を行った。

測定条件としては、流動層内速度を種々変えて、層高 $L_c=100, 200, 300\text{mm}$ 、粒子密度 $\rho_s=1.464\text{g/cm}^3$ (珪砂), 0.55g/cm^3 , 0.2g/cm^3 (石炭灰粒子)のそれぞれの組み合わせで測定を行った。また既報⁶⁾⁷⁾より最小流動化速度 U_{mf} は、それぞれ 0.46m/s , 0.28m/s , 0.25m/s である。ただし、すべて平均粒径は $\bar{d}_p=1\text{mm}$ のものを用いている。

3. 実験結果および考察

3.1 圧力変動周波数 f

Fig. 3(a)~(d)は、粒子密度 $\rho_s=1.464\text{g/cm}^3$ の静止層

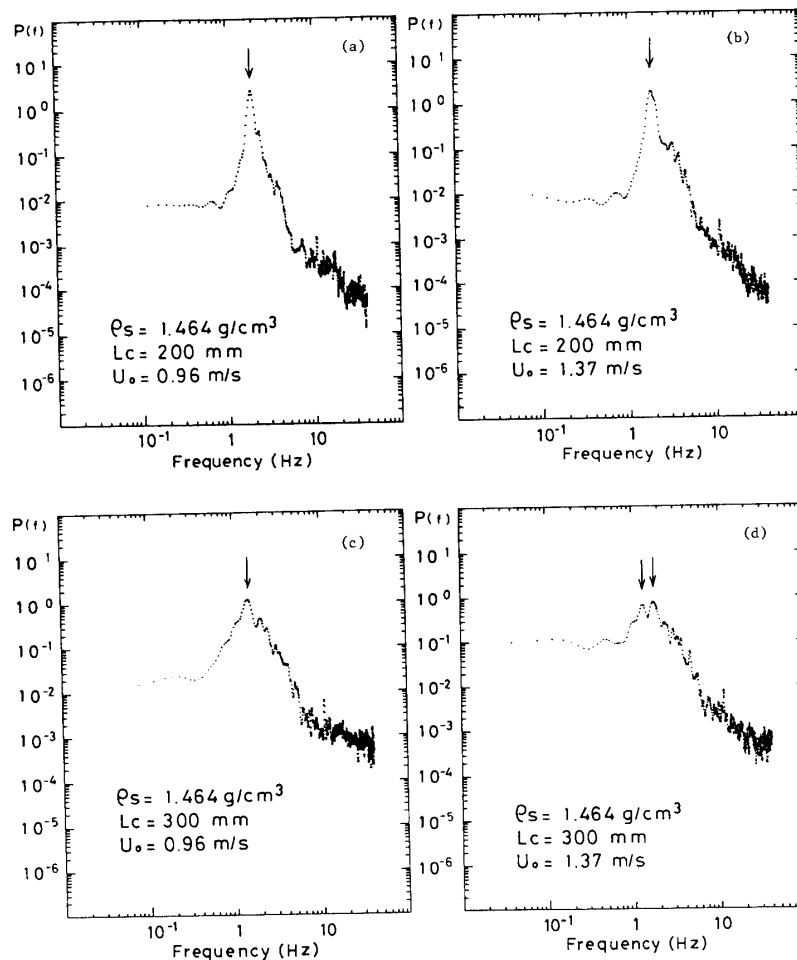


Fig. 3 Distributions of power spectrum

高 $L_c=200, 300\text{mm}$ におけるパワースペクトル分布を、二種類の流速に関して示したものである。

図(a)(b)あるいは図(c)(d)を比較すると、層高が低い時は、同じ分布形状でほぼ同じ位置に卓越した周波数成分（ピーク）を持つことから流速の影響はないと考えられるが、層高が高い時は、分布形状、ピークの位置とも流速によってわずかに変化し、この影響があるといえる。同じ流速で層高による影響を比較すると（図(a)(c)あるいは図(b)(d)の比較）、層高が低い場合、ピークの位置が明瞭に識別され、分布も比較的鋭い山を持つ形状を示すが、層高が高くなると、比較的なだらかな分布でピークの位置も高い周波数と低い周波数、あるいは三個の山を持つなどの形状も現れる。ここでは、このピーク全てを圧力変動周波数 f とし以後これについて検討を行う。

3.2 流速と圧力変動周波数との関係

Fig. 4 (a)(b)(c)は、流速（この場合、最小流動化速度で規準化）と圧力変動周波数との関係を、3種の粒子密度に対して示す。図中の実線、破線、鎖線は、層高300, 200, 100mmに対応するVerloopら³⁾の理論値を示

す。

低密度粒子ほど流速・層高の影響が強く、その値の多価性が見られるが、その中にあっても、層高 L_c が、300mmの場合は、どの粒子においてもその傾向は顕著である。また層高200mmにおいては、どの粒子においても一定した周波数を与えるようで、これは自己相関関数からも明らかにわかる（付録参照）。これは気泡の発生頻度とその上昇速度に密接に関係したものと思われる。この他にも定量的には、全般に実験値が理論値より低く出ていること、また U_0/U_{mf} がほぼ2前後から、ピークの多価性が顕著であることなどがわかる。熱伝達の変化も $U_0/U_{mf} \geq 2$ 以上で生じ（埋没管の場合）、この熱伝達と先の圧力変動とがいかなる関連を持つかは今後の大変興味あるところである。

さて、周波数の多価性において、低周波成分は、ほぼ一定の値を有し、これは流動層自体の固有の共振周波数とも考えられる。これに対して、高周波成分は、本結果ではさほど定性的傾向を示さず、このことはディストリビュータの形状、ガス溜の形状、粒子の形状・密度、測定的位置などの影響とも考えられるがより詳細に調べる必要がある。

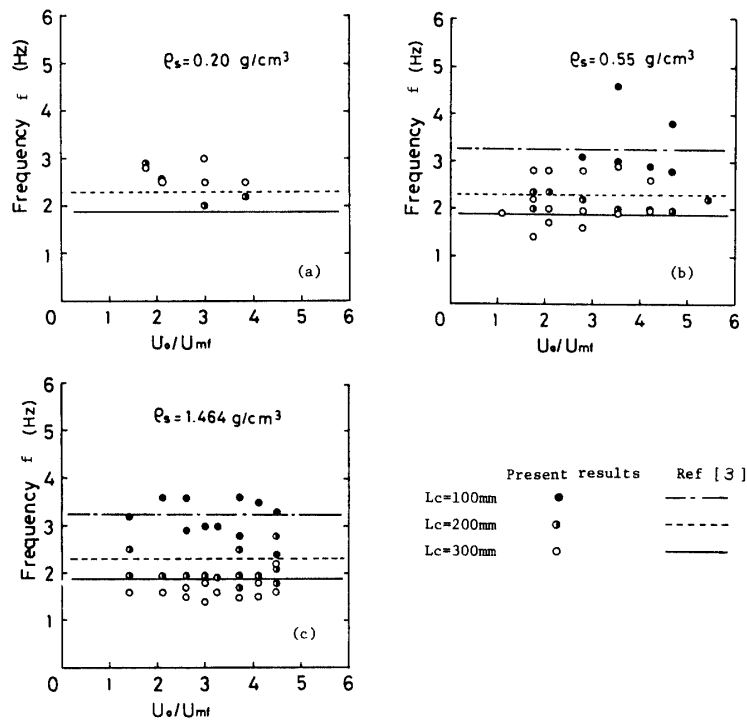


Fig. 4 Relationship between superficial gas velocity and the frequency of pressure fluctuation

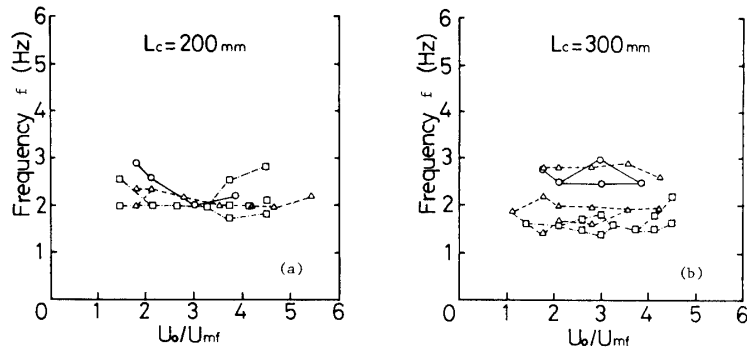


Fig. 5 Relationship between particle density and the frequency of pressure fluctuation
 ...□ $\rho_s = 1.464 \text{ g/cm}^3$, ...△ $\rho_s = 0.55 \text{ g/cm}^3$, —○ $\rho_s = 0.20 \text{ g/cm}^3$

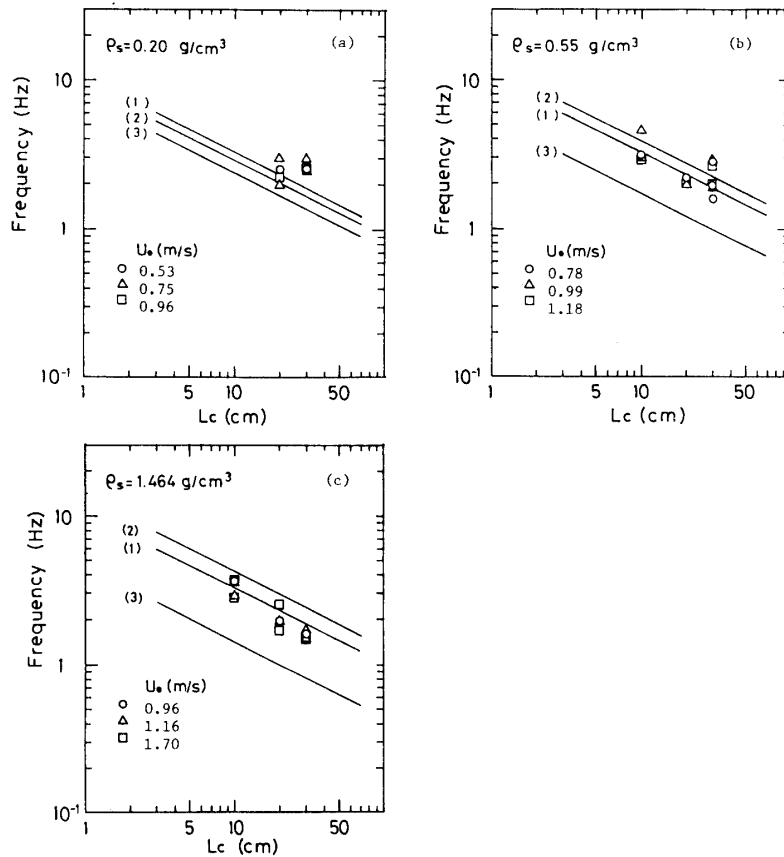


Fig. 6 Comparison with the frequency of pressure fluctuation
 (1) Verloop et al.[3] (2) Goossens[4] (3) Moritomi et al.[2]

3.3 粒子密度と圧力変動周波数との関係

Fig. 5 (a)(b)は、前節のFig. 4 から粒子密度をパラメータに圧力変動周波数 f をみるため再整理したものである。

層高が低いと密度の影響は、低密度ほど激しい。また $U_0/U_{mf} \approx 3$ 前後で全ての密度においてほぼ同じ値を持つ。この値近傍に、この系の気泡の発生・成長・破裂等の安定した周期性があることを示す。層高が高いと、粒子密度の影響は顕著で低密度ほどその多価性が

明白に見られる。層高が高いと気泡の挙動以外の要因が入ってくるものと思われる、それは高い周波数の一定の値を与えるものと思われるがそれに関する詳細はこれだけではわからない。

3.4 圧力変動周波数に関する比較

圧力変動周波数に関する研究は多々ある。本報では Table 1 の三グループの整理式を比較の対象とした。守富らの式において、ガス溜部（整流箱）の体積と流

Table 1 Previous equations of frequency of pressure fluctuation

No.	Author	Equation
(1)	Verloop et al.	$f = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{(2-\epsilon) \cdot g}{\epsilon L_c} \right]^{1/2} \cdot 3$
(2)	Goossens	$f = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{4.7(1-\epsilon)(\rho_s - \rho_g) \cdot g}{\epsilon \rho_s L_c} \right]^{1/2} \cdot 4$
(3)	Moritomi et al.	$f = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{P_b}{\rho_s L_c (V_b/A)} \right]^{1/2} \cdot 2$

路断面の比を考慮している以外、どの式も層高の $1/2$ 乗に反比例している点では同じである。

Fig. 6 (a)(b)(c)は、本実測値とTable1の研究者らの整理式との比較を示す。どの粒子密度においても、実験値はVerloopらの理論計算値と良い一致を示している。本実験と同じ条件（ガス溜部での測定）の守富らの式とは粒子密度が大きくなればなるほど偏りが大きく、彼らの計算値よりかなり大きい値をとる。

守富らの結果から、整流箱の体積 V_b の値が $0.02m^3$ を境にして、彼らの予測値と実験値は、 V_b が小さい場合は後者が小さく、 V_b が大きい場合は前者が小さくなる傾向にある。すなわち彼らの予測式にも若干の問題を残すものと思われる。また守富らの使用した固体粒子は、平均粒径 $160\mu m$ 、 $\rho_s=1.34g/cm^3$ 、 $U_{mf}=1.86m/sec$ であり、本実験で使用した粒子密度 ρ_s に近いほかは、粒径、最小流動化速度ともかなり異なり、このことも何らかの形で変動周波数に影響していると思われる。それにしても、Verloopらの力学的釣り合いから導出された理論値に本実測値が一致することから、本実測値が比較的力学的に安定したものとも思われるがはっきりとはまだ言い難い。

4. 結 論

流動層内圧力変動に関する実験的検討を行い以下の結果が得られた。

- (1) 流動層における層内圧力変動周波数 f は、静止層高 L_c 、粒子密度 ρ_s の影響が顕著であり、定性的にも定量的にも流速の影響はかなり小さい。
- (2) 流速 U_0/U_{mf} (流速と最小流動化速度の比) ≥ 2 以上で卓越周波数（ピーク）に高周波成分と低周波成分を有する多価性が現れる頻度が高い。このうち低周波成分はほぼ一定した値を示すことからこの装置の共振周波数とも考えられる。
- (3) 静止層高 L_c と圧力変動周波数 f との関係において、

本実験値は、Verloopらの理論による計算予測値と十分一致する。本実験に似た測定条件（ガス溜部での測定）の守富らの実験式による計算予測値とは異なり粒子密度が大きくなればなるほどその偏差も大きく、彼らの値よりかなり高い値をとる。

本報告では、まだ限られた範囲のデータであり今後更にデータの蓄積を待って、伝熱特性との関連を議論する予定である。

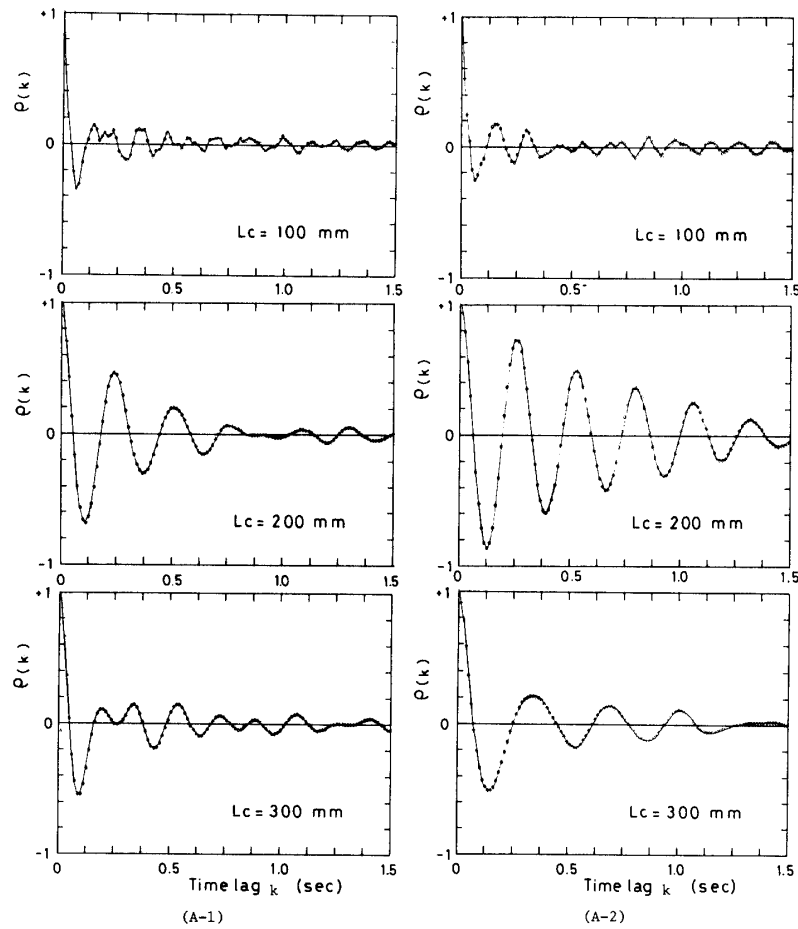
終わりに、本実験に多大の援助を賜った宇部興産・機械事業本部窯業加工プロセスグループの関係各位に御礼申し上げる。また卒論研究として本実験の遂行に御協力戴いた、井野川昭、渡辺良浩の両君に感謝の意を表します。

使用記号

- A : 流路断面積
- \bar{d}_p : 平均粒子径
- f : 圧力変動周波数
- k : 遅れ時間
- L_c : 静止層高
- \bar{P}_b : ガス溜（整流箱）内平均圧力
- U_0 : 平均塔内流速
- U_{mf} : 最小流動化速度
- V_b : ガス溜の体積
- ϵ : 充填率
- ρ_g : ガス（空気）密度
- ρ_s : 粒子密度
- $\rho(k)$: k時刻における自己相関関数

参 考 文 献

- 1) 鞭 巖, 堀尾正鞠, 森 滋勝: 『流動層の反応工学』(1984) 培風館*
- 2) 守富 寛, 森 滋勝, 荒木和男, 森山 昭: 化学工学論文集, 第6巻, 第4号, 392-396 (1980)
- 3) Verloop J. and P.M.Heertjes; Chem. Eng. Sci., 29, 1035-1042 (1974)
- 4) Goossens, W.R.A.; "Fluidization Technology", Vol. 1, 87 (1975) Hemisphere Pub. Corp.
- 5) 湯浅博司, 山口久盛, 松野儀三: 化学工学協会第18回秋期大会研究発表講演要旨集, 276 (1984)
- 6) 加藤泰生, 宮本政英: 山口大学工学部研究報告, Vol. 36, No. 2, 199-206 (1986)
- 7) 宮本政英, 加藤泰生, 出井安正: 第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 710-712 (1986)



Appendix Autocorrelations of frequency of pressure fluctuation

(A-1) $\rho_s = 0.55 \text{ g/cm}^3$, $U_0 = 0.99 \text{ m/s}$ (A-2) $\rho_s = 1.464 \text{ g/cm}^3$, $U_0 = 0.96 \text{ m/s}$ **付録 自己相関関数**

圧力変動の周期性は自己相関関数を見ることも知ることができる。付図の主目的は、流動層におけるスケール・アップのためのタイム・スケールなるもののデータを得るために行なった自己相関関数図である。これらは、本報においても考察の一助となるので付録として収録する。

図(A-1)は、粒子密度 0.55 g/cm^3 、流速 $U_0 = 0.99 \text{ m/s}$ の場合であり、図(A-2)は、粒子密度 1.464 g/cm^3 、流速 0.96 m/s の場合である。それぞれ程度の差こそあれ、その圧力変動の周期性は確認される。特に $L_c = 200 \text{ mm}$ の場合は、その周期性はもっとも明瞭ではないかと思われ、この結果は卓越周波数のピークの明瞭性にも関連している。

(昭和61年4月15日受理)