

流動層の圧力変動モデル

森元 映治*・高良 佳充**・早野 延男*

Pressure Fluctuation Model of Fluidized Bed

Eiji MORIMOTO, Yoshimitsu KOHRA and Nobuo HAYANO

Abstract

Dynamic model was proposed for pressure fluctuations for a gas-solid fluidized bed. Transfer function for plenum pressure variation was obtained from the equations which described mass balance around the plenum, pressure drop through the distributor, and pressure at the bottom of the bed. Validity of the model was studied in spectrum domain comparing experimental results acquired from three-dimensional apparatus processing sand whose mean diameter was 360 microns. Spectrum analyses showed dominant values which decreased as superficial gas velocity increased at frequencies of 8 Hz and 17 Hz. Peak value at the lower frequency was related to the oscillation of the bed, and another peak at the higher frequency was due to the inlet gas flow. The model was highly consistent with experimental results both in free bubbling fluidization regime and in more intensive fluidized regime with higher gas velocity. An ARMA model for the bed including blower system was presented taking into account the blower dynamics estimated from the step response results.

1. 緒 言

反応、造粒、分離、燃焼等の目的で使用される流動層内では滞留量、粒度等の粒子物性が時間的に変化する。このため流動化の状態を一定に保つには推移する内部の状態を検知し、これに適した風速を与えるようにコントロールすることが必要となる。空塔速度を調整する方法としてはバイパスを設ける方法、バルブによる方法¹⁾等があるが、駆動系の効率を考慮すれば送風機の回転数を変化させる方法が好ましいと考えられる。

気泡を伴う流動化では層内の圧力は時間とともに変

動する。その変動の様相は粒子の性質、流体の特性および流動条件、装置の幾何学的構造など数多くの要因によって影響を受けるが²⁾、温度や圧力による影響が無視でき、装置および流体側の条件が一定となる運転条件下では圧力変動を観測することによって流動化状態を推定することが可能となる^{3),4),5),6)}。

層内の圧力変動と気泡の挙動についてはこれまでいくつかの報告があるが^{7),8)}、現象の複雑さからまだ十分に解明されているとは言い難く、制御系のモデルとして採用するには問題を残す。また Hiraoka ら^{9),10)}は滞留時間と圧変動の動的モデルを与えているが著者らの対象とするシステムと構成を異なるにする。特に今回のシステムでは送風源の特性を考慮する必要があった。

以上の観点から本報では層部の圧力変動を検出し、送風機の回転数を直接調整して風速をコントロールする制御システムの構築を前提とした層モデルについて

*生産機械工学科

**大学院生産機械工学科

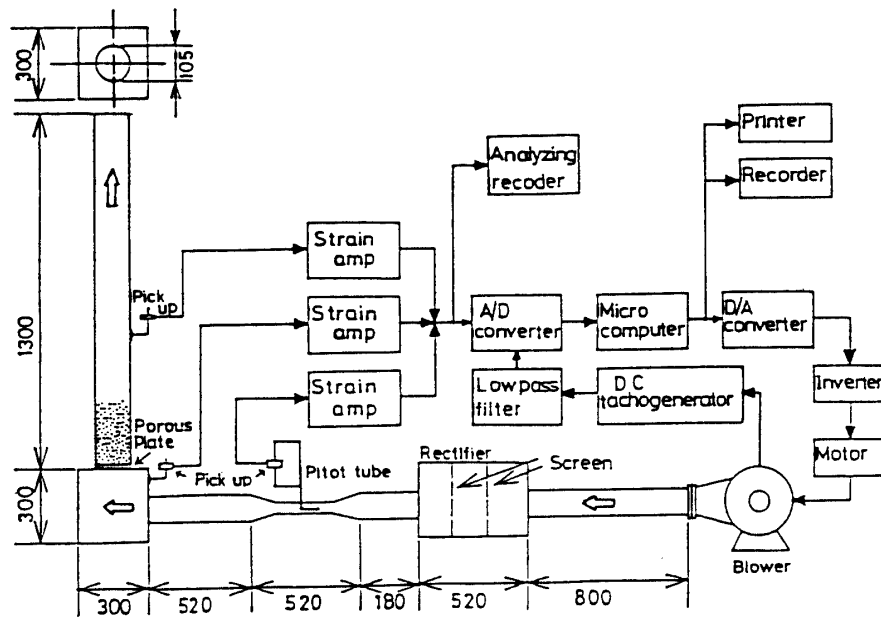


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

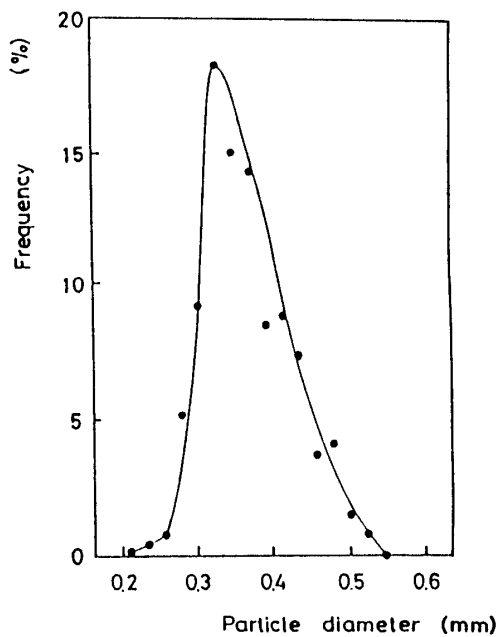


Fig. 2 Size distribution of the sand

溜めが設けてある。分散板として平均孔径 $40\mu\text{m}$ の多孔質焼結金属板を使用した。空気はブロワによる押し込み式とし、脈動を除去するために整流器を設けた。流速は整流器の後段位置でピトー管により測定した。また、層部の差圧は塔本体とガス溜めの側壁に設けた圧力タップ間で測定した。流速および圧力損失はいずれも半導体型差圧計により検出し、マイクロコンピュータで計測処理をおこなった。また、ブロワの設定回転数はマイコンを通じて入力し、インバータを介しコントロールした。なお、実験に使用した材料は平均粒径約 0.36mm (分散 6.5×10^{-4})の砂で、Fig. 2に粒度分布を示す。

実験は重量基準でおこなった。装置に粒子を一定量充填し、徐々に風量を増して流動化させたのち、風量をわずかつつ減少させ停止し静止充填層高を測定した。風量を一定としてガス溜めへの流入流速 U_i 、ガス溜めの圧力 P_0 を測定した。スペクトルはFFTアナライザーによるオンラインで処理した。

検討した。

2. 実験装置および方法

装置の構成を Fig. 1 に示す。流動層本体は、高さ1300 mm、内径105mmの透明アクリル管である。均一な流動化を得るため下部に高さ、幅、長さ、ともに300mmのガス

3. 圧力変動モデル

3.1 ガス溜内の圧力変動

流動層のモデル図を Fig. 3 に示す。ガス溜め内の質量バランスから次式を得る。

$$\frac{d(v_0 \rho_c)}{dt} = \bar{\rho}_c K_i U_i(t) - \bar{\rho}_c A U_0(t) \quad (1)$$

ここで、ガス溜め内の流体を理想期待と仮定すると、

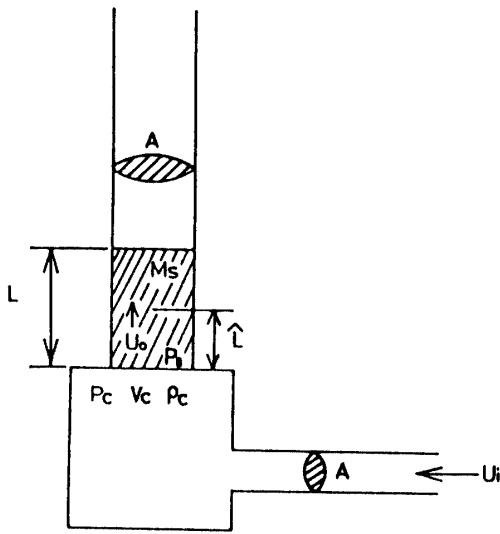


Fig. 3 Fluidized bed

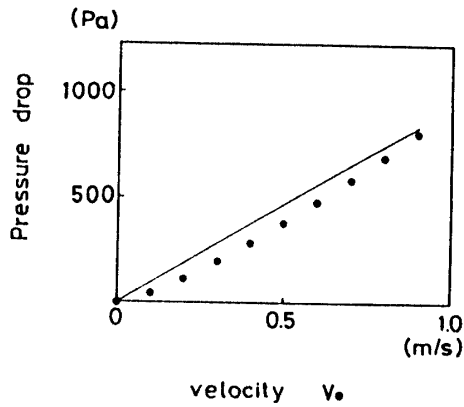


Fig. 4 Pressure drop through the distributor

$$P_c = \frac{M_s}{V_c} RT = \rho_c RT \quad (2)$$

したがって、

$$\bar{\rho}_c = \frac{\bar{P}_c}{RT} \quad (3)$$

$$\rho_c(t) = \frac{P_c(t)}{RT} \quad (4)$$

(1), (3), (4)式より、

$$\frac{V_c}{\bar{P}_c} \frac{dP_c(t)}{dt} = A_i U_i(t) - A U_o(t) \quad (5)$$

層底部の圧力 $P_B(t)$ 、ガス溜め内の圧力 $P_c(t)$ 、および分散板通過流速 $U_o(t)$ については加藤ら¹¹⁾および守富ら¹²⁾によって以下のように関係づけられている。

$$P_c(t) - P_B(t) = K_D U_o(t) \quad (6)$$

層底部での圧力変動は、層の振動に依存する。したがって層部中心の振動を考えると、

$$M_s \frac{d^2 L(t)}{dt^2} = A P_B(t) \quad (7)$$

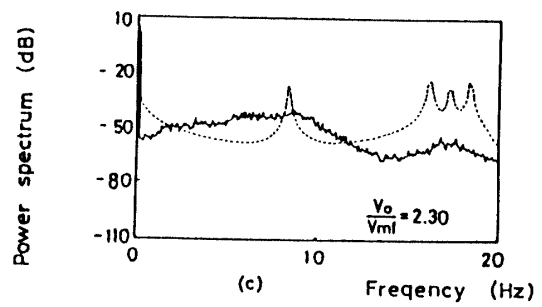
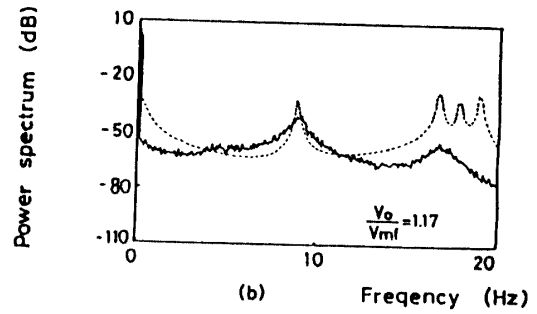
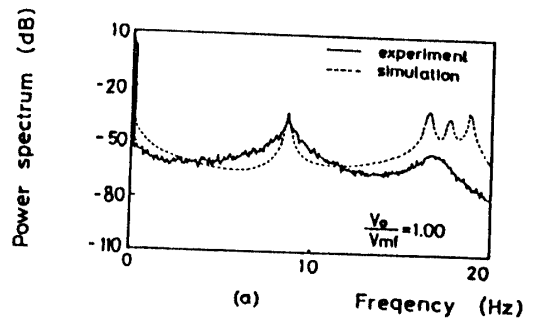


Fig. 5 Power spectrum of the pressure fluctuations at the plenum

ここで、 $2L(t) = \hat{L}(t)$ より

$$\frac{M_s}{2A} \frac{d^2 \hat{L}(t)}{dt^2} = P_B(t) \quad (8)$$

気泡は分散板上で発生し、層表面に達するまでの間に合体を繰り返しながら層を持ち上げ振動させている。したがって層の振動速度と気泡の上昇速度を次のように関係づける。

$$\frac{dL(t)}{dt} = U_b(t) \quad (9)$$

ここで気泡の上昇速度に Toomey-Jhonston の 2 相説¹³⁾を用いて表わせば、

$$\frac{dL(t)}{dt} = U_o(t) - U_{mf} \quad (10)$$

上式の両辺を微分して(8)式に代入すれば次式を得る。

$$\frac{M_s}{2A} \frac{dU_o(t)}{dt} = P_B(t) \quad (11)$$

以上の関係を整理すれば、層の基礎式は；

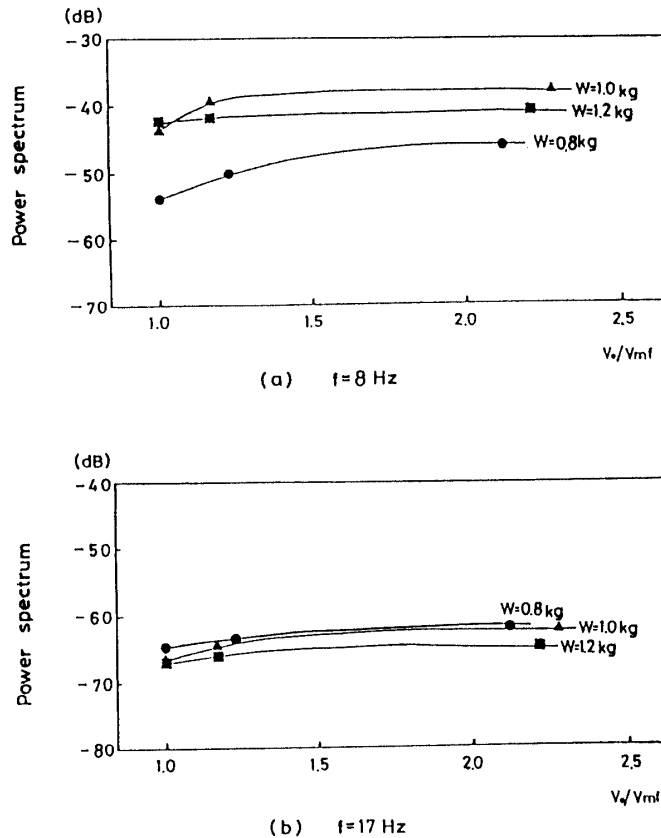


Fig. 6 Variation of the dominant frequency with the gas velocity

$$\frac{v_c}{\bar{P}_c} \frac{dP_c(t)}{dt} = A_1 U_1(t) - AU_0(t) \tag{12}$$

$$P_c(t) - P_B(t) = K_D U_0(t) \tag{13}$$

$$\frac{M_s}{2A} \frac{dU_0(t)}{dt} = P_B(t) \tag{14}$$

さらに上式をラプラス変換すれば；

$$\frac{v_c}{\bar{P}_c} s P_c(s) = A_1 U_1(s) - AU_0(s) \tag{15}$$

$$P_c(s) - P_B(s) = K_D U_0(s) \tag{16}$$

$$\frac{M_s}{2A} s U_0(s) = P_B(s) \tag{17}$$

したがって、ガス溜め内の圧力変動 $P_c(s)$ と風量 $U_1(s)$ の関係を求めれば；

$$P_c(s) = G(s) U_1(s) \tag{18}$$

ここに、伝達関係 $G(s)$ は次式で与えられる。

$$G(s) = \frac{\bar{P}_c A_1}{V_c} \frac{s + (2AK_D/M_s)}{s^2 + (2AK_D/M_s)s + (1A^2\bar{P}_c/M_s v_c)} \tag{19}$$

分散板圧力損失と流量の関係を実測した結果を Fig. 4 に示した。これより最小流動化速度が 0.6 m/s 付近であるため $U_0 > 0.5 \text{ m/s}$ 以上の部分で直線近似すれば $K_D = 3.4$ となる。

Fig. 5 は空気溜め内圧力変動のパワースペクトルで、 $f = 8 \text{ Hz}$ および 17 Hz に共振周波数を持つことがわかる。観測によれば気泡の発生頻度はたかだか数 Hz 程度であり、したがって気泡の上昇にともなって生じる粒子層の振動周波数もこれに近い値をとるものと推定された。Fig. 6(a) は 8 Hz におけるパワースペクトルの大きさと流速比との関係を見たものである。スペクトル値は平均風量とともに増大し、また層重量の増加とともに大きくなるのがわかる。したがってこの周波数帯における振動は粒子層自身の運動に起因したものであるといえる。この共振値は、L. T. Fan ら¹⁴⁾ が層内気泡滞留時間を考慮し Davidson-Harrison モデルから推定した気泡上昇速度より計算される周波数に近い値を示した。図中の破線は前に述べたモデルによる計算結果を示す。層振動に関してモデルは実験をよく説明しているといえる。流速が高まるにつれてスペクトル値全体が大きくなる傾向を示し、特に低周波数側でスペクトルの増加が顕著であった。このことは層重量を変えておこなった他の実験においても同様であった。流速の増加によって気泡の発生頻度が高まり、気

泡径分布が広がるとともに層の運動が激しくなる。同時に滞留時間分布幅も拡大し、このため振動に寄与する周波数成分に広がりを持つと考えられる。

また実験では流速比 U_0/U_{mf} が 2 を越えるあたりからモデルと実験との差が大きくなった。観察によればこの付近から流動化のモードに変化がみられ、それまでの層全体にわたる比較的均一な気泡の発生状態とは異なり、層内に大気泡が突発的に発生し粒子層が吹き上げられる状態になった。また層中に滞留する気泡体積が増加し、層全体に Gulf Stream¹⁵⁾ が発生するため、粒子層全体の循環を生じた。この振動周期は気泡の移動によるものより長く、したがって特に低周波数域でのパワースペクトルの増加を生じると考えられる。守富¹²⁾らによればフリーバブリング時の層内変動の平均周波数は層高が高いほど小さくなる。今回の実験によっても同様に層重量の増大にともないスペクトル値は増加する傾向を持つことが確認された。しかし実験上の

制約から今回重量の影響について定量的考察を行なうには至らなかった。

Fig. 6(b) は 17Hz でのガス溜め内圧力変動のスペクトルであり、層操作条件とは無関係であることを示す。Fig. 7 は流入ガスのスペクトルで、17Hz に共振周波数を持つことがわかる。このときスペクトル値は層重量および流量比にかかわらずほぼ一定の値を示した。以上のことより $f = 17\text{Hz}$ 付近のスペクトルは主に送風機による脈流によるものと考えられた。また $w = 1.2\text{kg}$ で $v_0/v_{mf} = 1.0$ および 1.2 においては $f = 8\text{Hz}$ 付近にもスペクトルが観測され、層側の圧力変動が流入管側へ伝播していることが確認された。

3.2 流動層システムの ARMA モデル

流動層の圧力変動に関し、ARMA モデルの適用について検討した。ARMA モデル (Autoregressive Moving Average Model: 自己回帰移動平均モデル) は AR モデルと MA モデルを組合せた形で表わされる。AR モデル (自己回帰モデル) は、出力が過去の有限個の出力のみに線形的に依存し、入力 e_t が白色雑音で表わされるもので、また、MA モデル (移動平均モデル) は、出力が過去の有限個の入力に依存しているものである。したがって、ARMA モデルは出力が過去の有限個の出力に線形的に依存し、また、有限個の過去の入力に線形的に依存している場合を示すモデルであり次式で表わされる¹⁶⁾。

$$y_t + \sum_{i=1}^{\infty} a_i y_{t-i} = \sum_{i=1}^{\infty} b_i e_{t-i} + e_t \quad (20)$$

流動層では気泡は塔底部で発生し、粒子層中を上昇しながら合体を繰り返して成長したのち、層上部表面に達して破裂する。この間にも底部では新たな気泡が次々と発生し、したがって先に発生した気泡群は下方から上昇する気泡に押し上げられる状態となり、それらの影響を受ける。また先に破裂した気泡によって吹き上げられた粒子が落下することにより層内に滞留する気泡群の挙動に影響をおよぼす。このように層内の圧力変動と流入量には気泡の挙動を介して強い相関を持つことが理解される。したがって入力を流量、出力を変動にとる流動層システムに ARMA モデルを採用することは妥当であると考えられる。

本システムは送風機系と流動層とによって構成されている。このため ARMA モデルの適用に際しその次数を設定する目的からまず送風機部分についての伝達関数について検討した。Fig. 8 に送風機の回転数をステップ状に変化させたときの流速の変化を示す。これより送風機系を 2 次遅れ系で表わした。先に得られたモデ

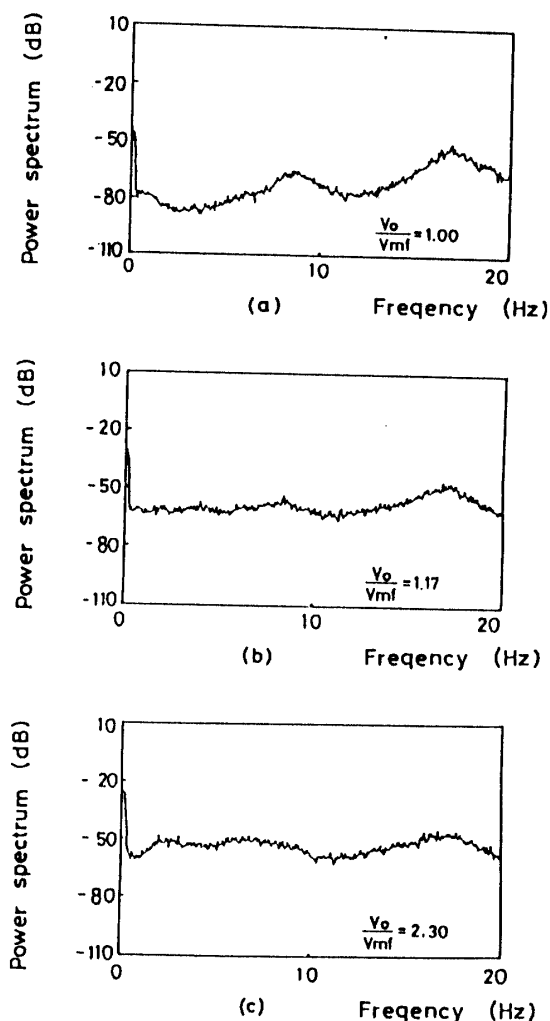


Fig. 7 Power spectrum of the inlet gas

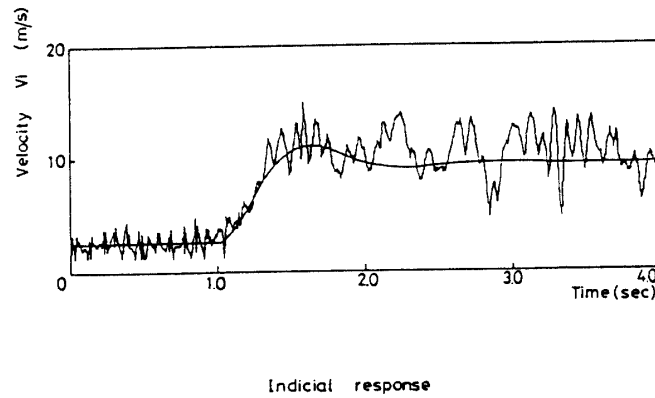


Fig. 8 Step response of the blower

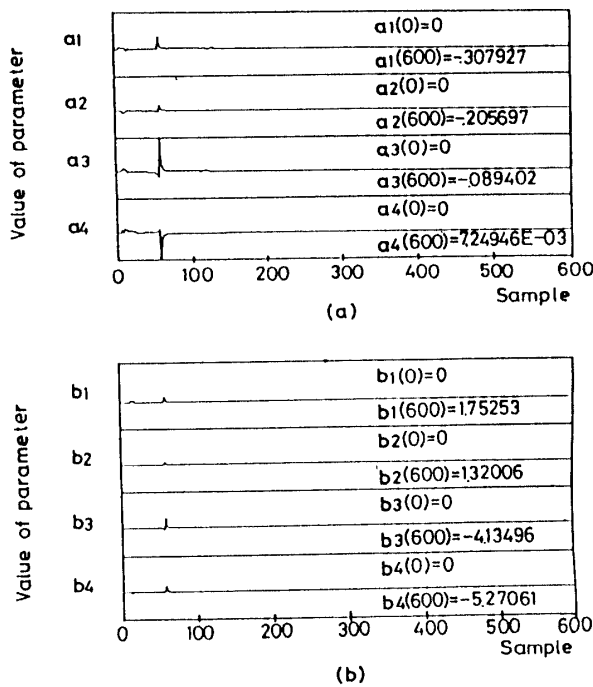


Fig. 9 Estimation of the parameters

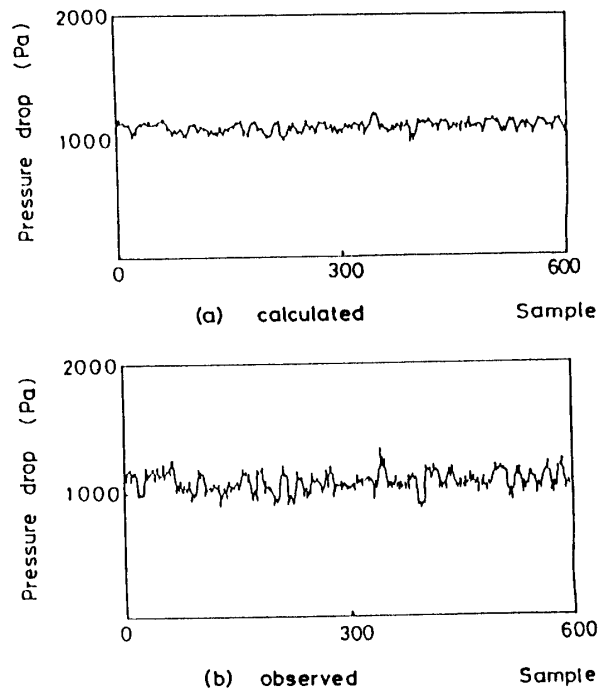


Fig. 10 Comparison between the calculated and observed pressure fluctuations

ルより流動層を2次系とすれば全体のシステムは4次系で表現できる。したがって送風機への電圧を入力、ガス溜め内の圧力を出力とするシステムを次式のように4次系として記述し、式中のパラメータについて実験的に検討をおこなった。

$$G(k) = \frac{P_c(k)}{U(k)} = \frac{\sum_{i=1}^4 b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^4 a_i z^{-i}} \quad (21)$$

パラメータ, $a_1 \sim a_4, b_1 \sim b_4$ は、最小二乗法によって求められた収束値を採用した。パラメータの推定過

程を Fig. 9 に示した。このときのサンプリング周期は 0.4sec である。得られたモデルを検証するため流動層に疑似白色信号を入力したときの出力 P_c の応答を Fig. 10 に実測値と比較して示す。両者はたいへん良い一致を示すことから本流動層システムに ARMA モデルを適用することが妥当であることが確認された。

4. 結 言

本研究より得られた結果を以下に要約する。

- (1) 流入ガス流速およびガス溜め内圧力変動をそれぞれ

- れ入, 出力とする流動層の伝達関数を1次進み+2次遅れ系で表わし, 実験値と比較してよく一致することを示した.
- (2) スペクトル解析により圧力変動の要因が気相の生成・上昇と流入ガス中のノイズであることを示した.
- (3) 流動層制御系に対する ARMA モデルの適用について検討し層部および送風機系のモデルをもとに設定した次数によって本システムを表わし得ることを確認した.

主な記号

- A : 塔断面積
 A_1 : 流入管断面積
 a_1 : パラメータ
 b_1 : パラメータ
 e_t : 不規則入力
 f : 周波数
 K_D : 分散板の圧力抵抗係数
 L : 層高
 $\hat{L} \equiv L/2$
 M_a : モル数
 M_s : 層質量
 P_B : 塔低部の圧力
 P_c : ガス溜め内の圧力
 \bar{P}_c : P_c の時間的平均値
 R : ガス定数
 T : 温度
 U_b : 気泡の上昇速度
 U_i : 流入流速
 U_o : 空塔速度
 U_{mf} : 最小流動化速度
 v_c : ガス溜め内の体積
 y_t : 観測値
 ρ_c : ガス溜め内の空気密度
 $\bar{\rho}_c$: ρ_c の時間的平均値

参考文献

- 1) Chong, Y. O. ほか 4 名, Powder.Tech., **53**, 237 (1987)
- 2) Haung, L. T. ほか 3 名, AIChE J., **27-3** May, 388 (1981)
- 3) Shuster, W. W., and P. Kisliak, Chem. Eng. Progr., **48**, 455 (1952)
- 4) Winter, O, AIChE J., **14**, 426 (1968)
- 5) Morimoto, E. ほか 2 名, Tech. Rep. Yamaguchi Univ., 1-1, 11 (1987)
- 6) Morimoto, E. ほか 2 名, Tech. Rep. Yamaguchi Univ., 1-1, 23 (1987)
- 7) Wong, H., and M. H. I. Baird, Chem. Eng. J., **2**, 104 (1971)
- 8) Verloop, J., and P. M. Heertjes, Chem. Eng. Sci., **29** 1035 (1974)
- 9) Hiraoka, S. ほか 3 名, Powder Tech., **38**, 125 (1984)
- 10) Hiraoka, S. ほか 3 名, Powder Tech., **45**, 254 (1986)
- 11) 加藤 隆, 鞭 巖, 化学工学論文集, **2-2**, 115 (1976)
- 12) 守富 寛, ほか 4 名, 化学工学論文集, **6-4**, 392 (1980)
- 13) Toomy, R. D., and H. F. Jhonston, Chem. Eng. Progr., **48**, 220 (1952)
- 14) Fan, L. T., ほか 2 名, AIChE J., **30-2**, 346 (1984)
- 15) Merry, J. M. D., and J. F. Davidson, Trans. Inst. Chem. Engrs, **51**, 361 (1973)
- 16) 例えば相良節夫ほか 3 名, システム同定(1981)222, 計測自動制御学会

(昭和63年4月15日受理)