

# スクリーフィーダによる粉粒体の定量供給システム

和田憲造\*・森元映治\*・伊藤晋治\*\*・湯沢 隆\*\*\*

## Control System for Accurate Granular Feeding using a Screw Feeder

Kenzo WADA, Eiji MORIMOTO, Shinji ITO and Takashi YUZAWA

### Abstract

Many modern manufacturing industries use granular materials as raw materials. A highly accurate feeder is needed to supply granules to processes in order to maintain the quality of products. There are various types of feeders depending on the purposes and the nature of supply materials. Improvements in current high accuracy feeders and/or control systems are required.

In this study, a screw feeder together with a control system, including a flowmeter as a sensor, is discussed. Two types of flowmeter are used. One is an impact-type flowmeter in current use. The other is a prototype strain-gauge-type flowmeter developed at the author's laboratory. The characteristics of the flowmeters, such as speed of response and the difference of response depending on the nature of supply granules, are examined. A control system using the flowmeters as the detecting element in order to supply fixed quantities with high accuracy was constructed. A self tuning regulator (STR) scheme is applied to the system as the control method.

The results show that the strain-gauge-type flowmeter is more sensitive as a detecting element. Good response waves were obtained for a step reference input and a disturbance input.

### 1. 序 論

現在、原料に粉粒体を使用している製造業では、製品の品質維持のため、高精度の定量供給装置が求められている。また、供給精度の向上は、プロセスの連続化、自動化を進める上からも必要不可欠な条件となっている。供給装置の中で粉粒体を一定の精度内で定量的に供給することを目的とした装置をフィーダと称している。フィーダには様々な形式のものがあり、使用目的や使用粉粒体により使い分けられている。

本研究では、供給装置としてスクリーフィーダを使用し、比較的小流量を対象とした粉粒体の定量供給

システムにおいて、検出端である流量計の特性ならびに制御性能について検討を行った。

粉粒体の定量供給システムを構成する上で、検出端である流量計は重要な構成要素の一つである。したがって、流量計の特性ならびに種々の粉粒体による検出特性の違いを十分に把握しておく必要がある。

今回、流量計として新たに歪式流量計を製作し、流量計の特性および流出量の変動をモデル化する場合に必要となる、各粉粒体による検出特性の違いについて検討を行った。さらに、従来から使用されているインパクトライン流量計<sup>2)</sup>との比較検討を行った。インパクトライン流量計は、粉粒体が落下する際の衝撃力により回転するアームの回転角をもとに、流出量を検出するものであるが、これに対し、歪式流量計は、アームを固定し、粉粒体が落下する際の衝撃力により生じるアームの歪みをもとに流出量の検出を行っている。

最後に、この二種類の流量計を検出端として、定量

\*機械工学科

\*\*大学院生産機械工学専攻

\*\*\*大学院機械工学専攻

供給システムを構成した。制御方式として、確率環境下においてロバストであり、しかもプラントの動特性の変化に対して、その特性をオンライン的に自動調整し、制御系としての性能を常に良好にたもつSTR (self-tuning regulator) 制御方式<sup>3)</sup>を適用し、スクリーフィーダによる定量供給システムの実現を試みた。

## 2. 実験装置

システム全体の概略図を Fig. 1 に示す。システムはスクリーフィーダ、フィードホッパ、流量計、サーボモータおよびパーソナルコンピュータなどから構成されている。

スクリーフィーダの流出量は流量計により検出され、電圧に変換された後ストレインアンプで増幅される。増幅された電圧は、A/D コンバータを通してコントローラであるパーソナルコンピュータによりサンプリングされる。ここであらかじめプログラムされている制御式により操作量が計算され、操作部であるサーボモータの回転数を操作することによって、スクリーフィーダの流出量を制御している。なお、フィードホッパへの流入量は供給ホッパのスライドバルブで調整されている。なお本実験では、粒径が小さく、かつ流動性のよい粉粒体としてポリプロピレンおよび砂、また粒径の大きい粉粒体としてナイロンチップおよびコークスを用いた。各粉粒体の物性値を Table 1 に示す。

## 3. 歪式流量計

### 3.1 歪式流量計の導入

従来、粉粒体の瞬間流量の測定に用いられてきたインパクトライン流量計は、粉粒体が落下する際の衝撃力により、水平面内で回転するアームの回転角を検出して流量を検出する方式である。この流量計は渦巻ばねおよびオイルダンパからなる2次の回転振動系をなしており、衝撃力をうまく吸収できる点で大流量から小流量まで幅広く用いられている。しかし、インパクトライン流量計はオイルの粘性あるいはばねの剛性の変化によりその特性が変化し、応答速度および検出特性に影響をもたらすと考えられる。特に小流量を測定する場合に、その影響は顕著に現れる。そこで小流量に対して、流量計のアーム部を固定し、落下する粉粒体の衝撃力により生ずるアームの歪みをもとに流出量を検出する方法を考案した。アームを固定することにより、インパクトライン流量計において複雑だった構造を簡略化できるという利点もある。

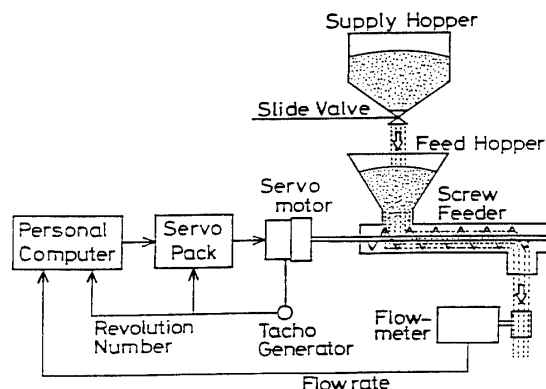
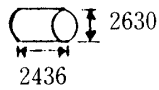


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Properties of granules

	Mean diameter ( $\mu\text{m}$ )	Bulk density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Angle of repose (deg)
Polypropylene	450	0.58	27.4
Nylon chip		0.72	32.8
Sand	317	1.37	36.1
Coke	4120	1.80	32.0

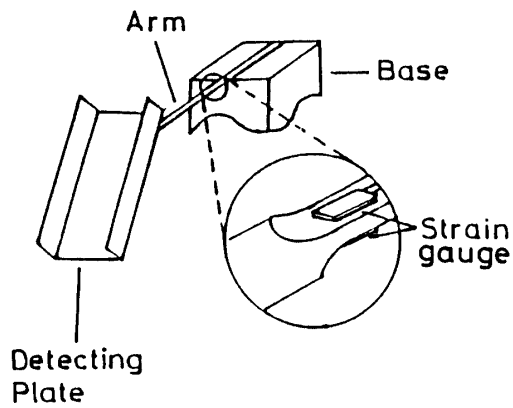
### 3.2 歪式流量計の構造

歪ゲージを用いた力センサの基本的構造として、直線はり受感型<sup>5)</sup>を採用する。この形式は、センサが感知する力の成分方向により、垂直分力受感型と水平分力受感型の二通りの方式に分類される。前者を垂直型歪式流量計、後者を水平型歪式流量計と呼ぶことにする。各流量計の構造の概略を Fig. 2 に示す。垂直型において、流出量検出の際に生じるアームの振動を抑えるために、検出板にアクリル板を使用して検出部分の軽量化を図った。以下、この二通りの歪式流量計について検討を行った。

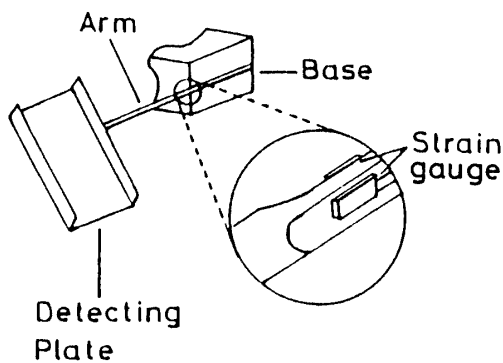
### 3.3 歪式流量計の特性

#### 3.3.1 静特性

まず最初に、歪式流量計の静特性について調べた。Fig. 3 に垂直型および水平型歪式流量計における静荷重と歪みの関係を示す。垂直型では、アームの検出板固定部分に静荷重を垂直方向に負荷し、一方、水平型



(a) vertical type



(b) horizontal type

Fig. 2 Schematic diagram of the strain-gauge type flowmeter

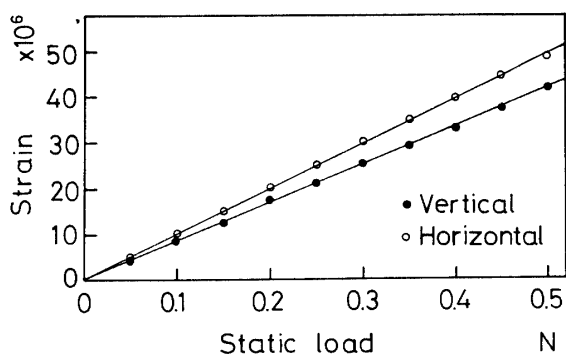
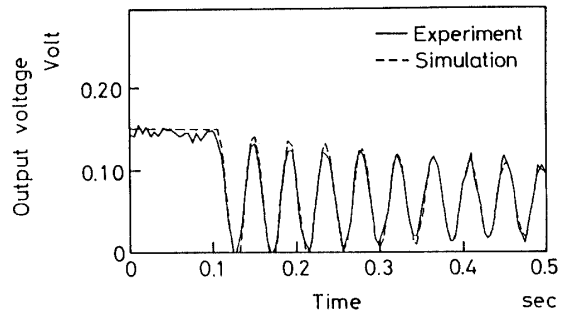
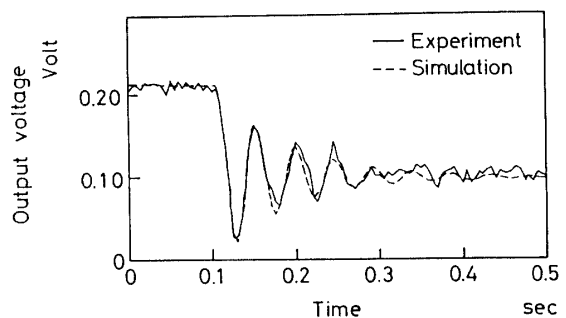


Fig. 3 Relation between static load and strain

では、衝撃力の水平分力の検出を行っていることから、検出板に滑車を用いて静荷重を水平方向に負荷した。二方式とも、静荷重と歪みの間には良好な直線性を示しており、流量計として良好な特性を有しているといえる。



(a) vertical type



(b) horizontal type

Fig. 4 Response of the flowmeter for a step input

### 3.3.2 動特性

次に、流量計にステップ入力を与え、その動特性について調べた。ステップ入力として、検出板に加える荷重を $9.80 \times 10^{-2}$  [N] から $4.95 \times 10^{-2}$  [N] に突変させ、流量計の応答を調べた。その時の応答波形を Fig. 4 に実線で示す。図より、垂直型は水平型に比べ、かなり振動的となっている。これは、垂直型では検出板部分の慣性により、アームの減衰が妨げられているからだと考えられる。

両者の応答波形より、流量計の特性を次の2次遅れ系で近似することにする。

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

$\omega_n$ : 固有角振動数 [rad/sec],  $\xi$ : 減衰係数  
上式の  $\xi$ ,  $\omega_n$  はシミュレーションをもとに決定した。このときのパラメータを Table 2 に示す。これらのパラメータに対するシミュレーション波形を Fig. 4 に破線で示す。実験値と理論値がよく一致しているのがわかる。

Table 2 Parameters of the strain-gauge-type flowmeter

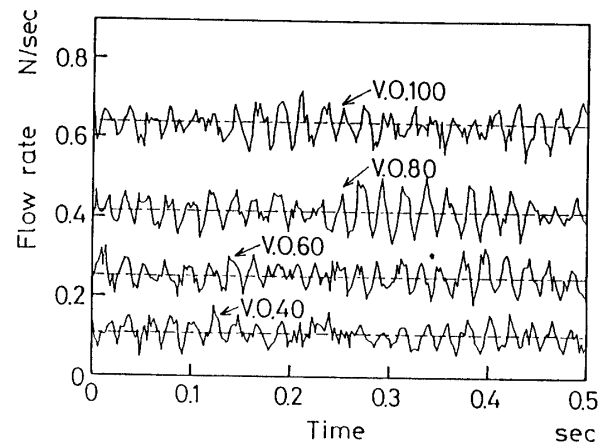
	Vertical	Horizontal
$\omega_n$ [rad/sec]	145	135
$\xi$	0.013	0.09

### 3.3.3 流出量の変動特性

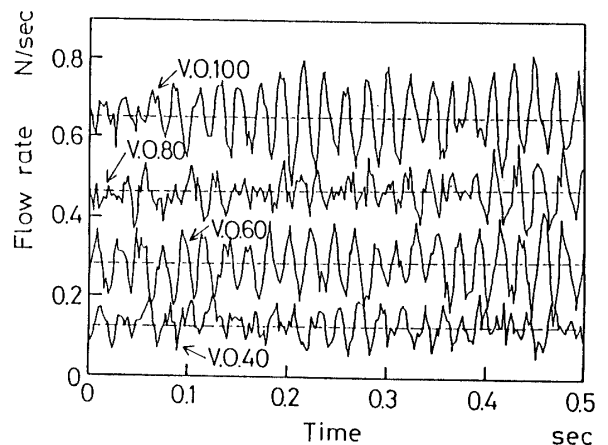
#### 1) 検出流出量の変動特性<sup>4)</sup>

歪式流量計で検出される流出量変動の性質を把握するために、各粉粒体において流出量を変化させ、そのときの流出量の変動の様子を調べ、その自己相関関数を求めた。粉粒体はミニホッパから流出させ、流出量はホッパのスライドバルブ（矩形断面：縦52mm×横20mm）の開度を変えることにより変化させた。垂直型と水平型の両流量計で検出した流出量変動の一例を Fig. 5 に示す。図は粉粒体としてポリプロピレンを用いたときの変動の様子を表している。流出量はかなりランダムに変動しているのがわかる。Fig. 6, 7 にポリプロピレン、砂、ナイロンチップおよびコークスの各バルブ開度における流出量変動の自己相関関数を示す。図中の V. O. はバルブ開度の大きさを表しており、排出口の大きさが縦40mm×横20mmの時のバルブ開度を V. O. 100 (開度100%) としている。また流出量の変動は、サンプリング周期 5 msec で測定した。図中の破線は、入力として白色雑音を流量計のダイナミクスに通過させたときの出力の理論相関関数を表している。

粒径の比較的大きいナイロンチップおよびコークスを流した場合、両流量計とも自己相関関数はバルブ開度に関係なく、ほぼ同一の傾向を示している。また、垂直型においては理論相関関数ともよく一致していることから、この場合の流出量の変動は、流量計に白色雑音加わったときの流量計の出力としてモデル化できることがわかる。水平型では各流出量でほぼ同様の傾向を示しているが、理論相関関数に比べて変動の周期が短くなり、また相関の度合いが強くなっている。この原因として、水平型の場合は流量計の検出板がナイロンチップあるいはコークスが落下する際の衝撃力の水平分力により加振され、結果として流量計のダイナミクスが変化しているためと考えられる。次に、流動性の良好なポリプロピレンと砂の場合、両流量計とも相関関数は流出量によりばらつきを生じている。特に垂直型歪式流量計において、粉粒体として砂を使用したときにその傾向が著しい。これは垂直型の流量計



(a) vertical type



(b) horizontal type

Fig. 5 Fluctuation of the outflow quantity (polypropylene)

の場合、その構造上、粉粒体が検出板上を滑り落ちる際の不規則な運動および検出板上における粉粒体の滞留の影響を直接受けているためである。また図から流出量が小さくなるにつれ滞留の影響が大きくなっているが、これはミニホッパから排出された粉粒体の衝撃力により生じる歪みが滞留による歪みに比べて小さくなり、結果として滞留の影響が大きくなっていると思われる。

以上のことから、粒径の大きい粒体に対しては、滞留が生じず、また流出量の変動が白色雑音として表され、かつ流出量変動のモデル化が容易である垂直型歪式流量計が適していると思われる。一方、粒径の比較的小さいポリプロピレンおよび砂に対しては、滞留の影響がより小さい水平型歪式流量計が適していると思

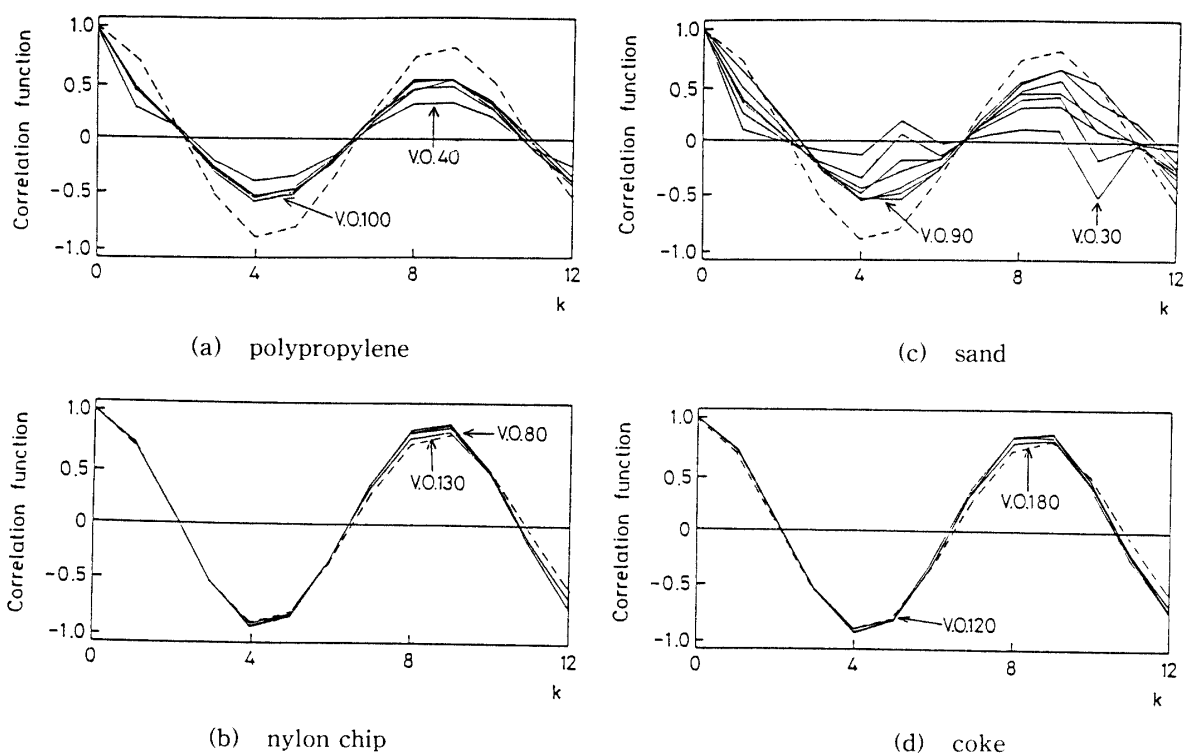


Fig. 6 Autocorrelation function of the output of the vertical-type flowmeter

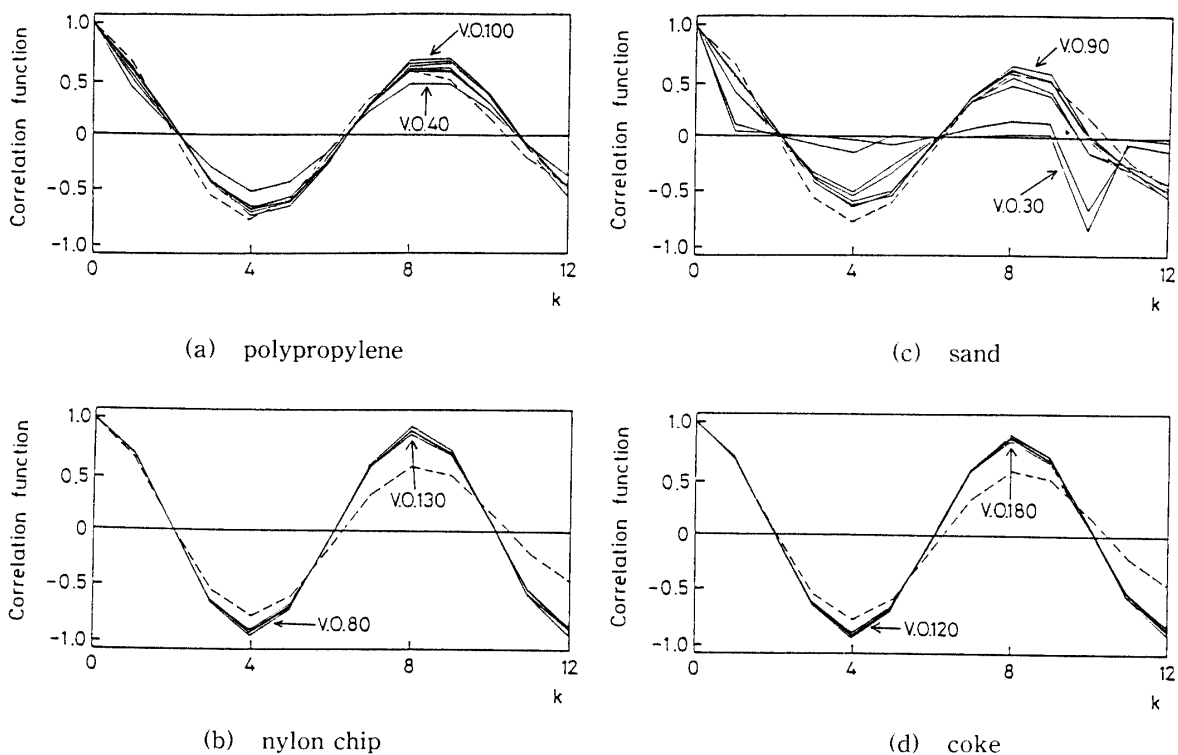


Fig. 7 Autocorrelation function of the output of the horizontal-type flowmeter

われる。

## 2) 検出板の感知位置による影響

粉粒体が検出板上に落下する位置は、常に検出板のほぼ中央部に当たるように設定している。しかし流出量の大小により、粉粒体の当たる位置に必然的にずれが生じる。そこで、粉粒体の落下位置の影響を調べるために、検出板の上部、中央部、下部の三ヶ所に、粉粒体を落下させ、そのときの変動特性について調べた。

ポリプロピレンや砂などの粒径が小さく流動性のよい粉粒体は、両流量計とも検出位置が上部になるほど滞留の影響がはっきりと表れ、特に砂においてその影響が顕著であった。ナイロンチップあるいはコークスのように粒径の大きいものは、検出位置の違いにかかわらず、両流量計ともほぼ同様の傾向がみられ、理論相関関数によく一致している。これは粒径の小さいものは、検出板上を滑り落ち、粒径が大きくなるにつれて検出板上でランダムな変動をしていることを示している。

### 3.3.4 インパクトライン流量計<sup>2)</sup>との比較

粒径の大きいナイロンチップおよびコークスを使用したとき、インパクトライン流量計と歪式流量計により検出された流出量の変動は同じような傾向を示す。また、流動性の良好な砂およびポリプロピレンを使用した場合の滞留の影響は、歪式流量計に比べてインパクトライン流量計の方が小さい。したがって、インパクトライン流量計はいずれの粉粒体に対しても使用可能である。しかし、歪式流量計はインパクトライン流量計に比べ、構造が簡単で、応答速度が速くかつ流出量の微小な変動に対しても敏感に反応することから、垂直型・水平型の流量計を粉粒体により使い分けることによって、小流量の検出端として歪式流量計を用いることが可能と思われる。

## 4. 定量供給システムについて

前章で検討を行った垂直型・水平型歪式流量計およびインパクトライン流量計を検出端として、粉粒体の定量供給システムを構成した。制御方式として、確率環境下においてロバストとされているセルフチューニングレギュレータ (STR) 方式を適用した。ここでは流出量の変動は流量計に白色雑音を入力したときの出力としてモデル化をおこなう。

プロセスを次式で記述する。

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) + w(k) \quad (2)$$

$$N(z^{-1})w(k) = \lambda M(z^{-1})e(k) \quad (3)$$

ここで  $y(k)$ ,  $u(k)$ ,  $w(k)$  はそれぞれプロセスの出力、入力、および流出量の変動を表している。また  $A(z^{-1})$ ,  $B(z^{-1})$ ,  $N(z^{-1})$ ,  $M(z^{-1})$  はそれぞれ次式で表される多項式であり、

$$\left. \begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{nB}z^{-nB} \quad (b_0 \neq 0) \\ N(z^{-1}) &= 1 + n_1z^{-1} + \dots + n_nz^{-n} \\ M(z^{-1}) &= 1 + m_1z^{-1} + \dots + m_mz^{-m} \end{aligned} \right\} (4)$$

$M(z^{-1})/N(z^{-1})$  は流量計の伝達関数である。 $\lambda$  は流出量の変動の大きさを表す係数である。また、 $e(k)$  は  $(0,1)$  の白色雑音であり、 $d$  はプロセスのむだ時間である。なお本プロセスは最小位相系である。確定環境下での STR 制御の目的はトラッキングにおいては、

$$C_1(z^{-1})y_m(k) = z^{-d}D(z^{-1})u_m(k) \quad (5)$$

を満足し、またレギュレーションにおいては、

$$C_2(z^{-1})\varepsilon(k+d) = 0 \quad (6)$$

$$\varepsilon(k) = y(k) - y_m(k) \quad (7)$$

を満足することである。ここで、 $y_m$  は規範モデルの出力、 $u_m$  は有界な規範入力である。これらを満足する制御入力  $u(k)$  は次式で与えられる。

$$u(k) = \frac{C_2(z^{-1})y_m(k+d) - \hat{\rho}_0^T \phi_0(k)}{\hat{b}_0(k)} \quad (8)$$

ただし、 $\phi_0^T(k)$  は入出力ベクトル、 $\hat{\rho}_0^T$  はパラメータベクトルの推定値である。このとき適応アルゴリズムとして、次のトレース一定アルゴリズムを用いた。

$$\hat{\rho}(k) = \hat{\rho}(k-1) + F(k) \phi(k-d) \nu^*(k) \quad (9)$$

$$F(k+1) = \frac{1}{\lambda_1(k)} \left[ F(k) - \frac{F(k) \phi(k-d) \phi(k-d)^T F(k)}{\lambda_1(k) / \lambda_2(k) + \phi(k-d)^T F(k) \phi(k-d)} \right] \quad (10)$$

ここで  $\nu^*(k)$  は適応誤差と呼ばれるものである。

## 5. 実験結果

固定トレースアルゴリズムにおいて、 $\lambda_1(k) = \lambda_2(k)$  とした (トレースの値を 1 I とした。ただし I は単位行列)。また、サンプリング周期は 1 秒とした。なお本研

究では、応答のダイナミクスを規定する多項式を  $C_2(z^{-1}) = 1 - 0.1z^{-1}$  とした。規範応答として、2次系 ( $\zeta = 0.5, \omega_0 = 0.2$ , むだ時間  $d = 1$ ) の規範モデルにステップ入力を与え、この出力を規範応答として用いた。実験に際してはパラメータの初期値は  $\hat{b}_0(0)$  以外はすべて0とし、 $\hat{b}_0(0)$  にはプラントを同定した際の同定結果を用いた。

脈動を低減するため、スクリーをフィードホッパ側に3ピッチ分ずらした位置で実験を行った。さらに、アームの自由振動による周波数成分を取り除くため、カットオフ周波数5 Hzのローパスフィルタを用いた。粉粒体としては、それぞれ特性の異なるポリプロピレンおよびナイロンチップを用いた。

#### (1) ポリプロピレン

各流量計における、規範応答および外乱に対する応答波形を Fig. 8 に示す。なお流出量の設定値は0.2 [N]、外乱の大きさは0.1 [N] とした。

#### (2) ナイロンチップ

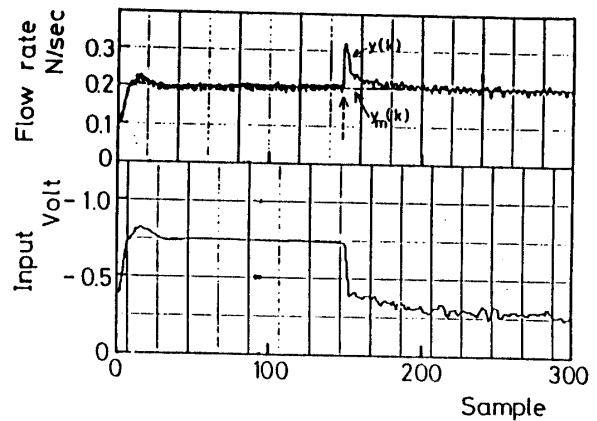
各流量計における、規範応答および外乱に対する応答波形を Fig. 9 に示す。なお流出量の設定値は0.5 [N]、外乱の大きさは0.2 [N] とした。

いずれの流量計を用いた場合もプロセスの応答は規範応答に良く追従しており、また、外乱に対しても定常偏差を生じることなく非常に良好な応答が得られた。外乱としては、約150サンプル時点で、ミニホッパから流量計にステップ状に一定の流量を与えている。

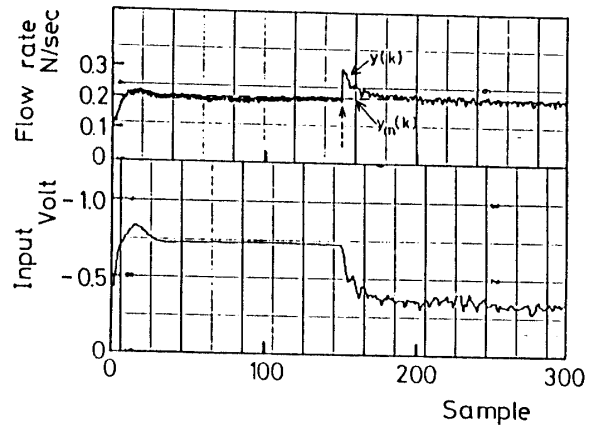
ナイロンチップの場合に、外乱混入後に若干の変動を生じているが、これは、外乱として、ミニホッパから一定流量を流したとき、ホッパの排出口でときどき閉塞を生じたためである。

外乱に対しては歪式流量計を用いた方がインパクトライン流量計を用いたときよりも応答が速い。特に垂直型歪式流量計を使用したときに外乱混入後の設定値への復帰が最も速かった。これは、垂直型の場合、歪み量の感知方向が垂直方向となっており、外乱の衝撃力を直接受けているためと思われる。インパクトライン流量計は、アームが可動し渦巻ばねとオイルダンパによる減衰機構をもっているため、歪式流量計に比べ流出量の変化に対し多少応答が鈍くなっている。

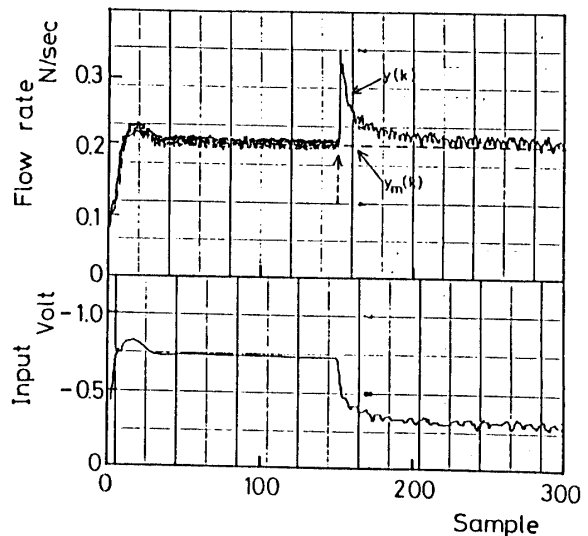
以上、歪式流量計を制御システムの検出端として用い、その制御性能などについて調べたが非常に良好な応答が得られ、またインパクトライン流量計を使用した場合と比較してほとんど同等の制御結果が得られ、流出量の検出端として十分使用可能であることがわかった。今後さらにシステムの供給精度ならびに微小流量の検出について検討していく必要がある。



(a) vertical type



(b) horizontal type



(c) impact-type

Fig. 8 Response of the process for the step input and the disturbance input (polypropylene)

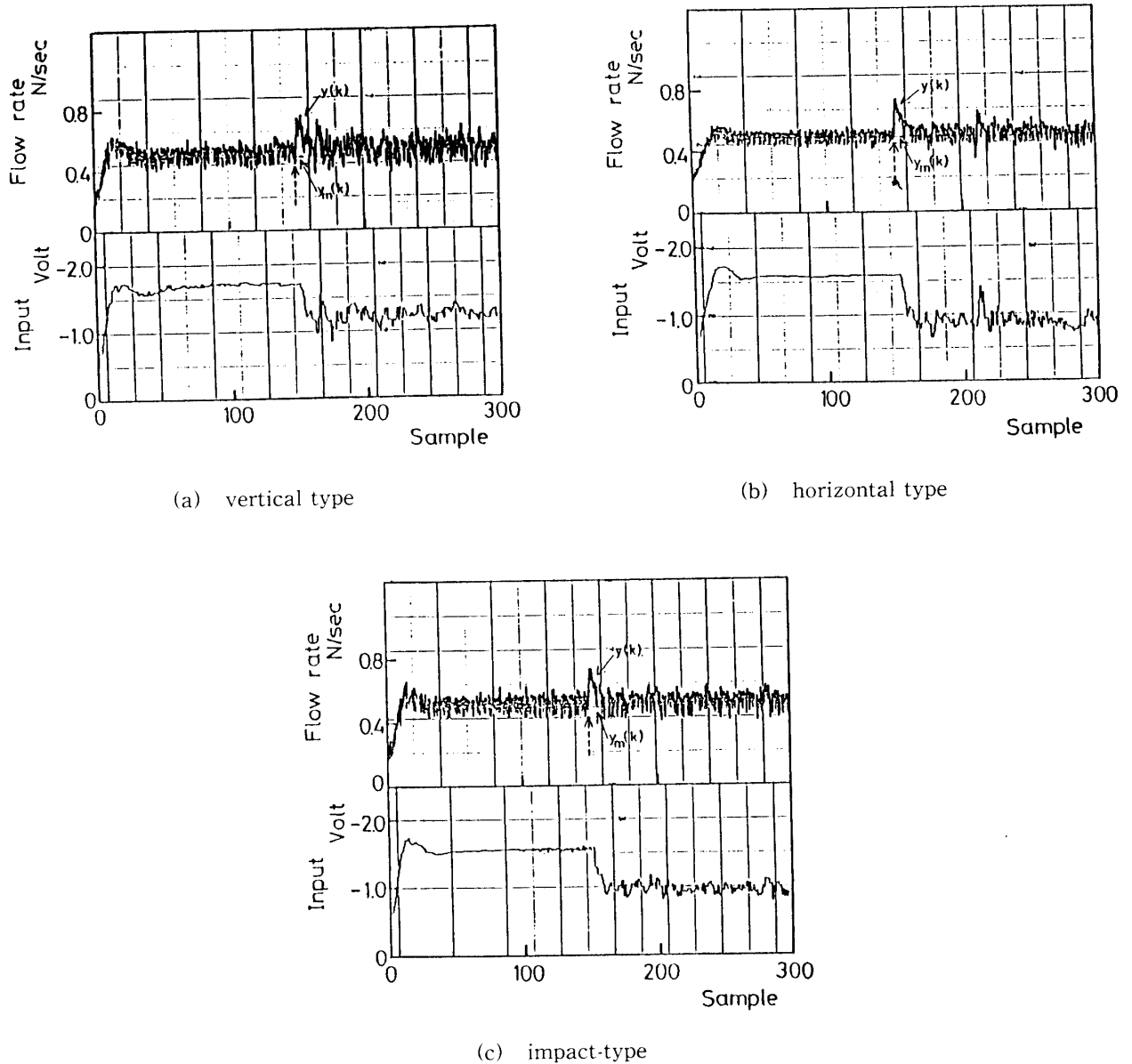


Fig. 9 Response of the process for the step input and the disturbance input (nylon chip)

## 6. 結 論

今回、新たに流出量の検出端として歪式流量計を考案し、この流量計の諸特性について検討を行った。また、従来のインパクトライン流量計と歪式流量計を制御システムの検出端として組込み、粉粒体の定量供給システムを構成した。制御方式としては、STR制御方式を適用し、検出端の違いによる制御性能について検討を行い、以下のことが明らかになった。

- ①歪式流量計は静荷重と歪みとの間に良好な線形関係を示し、検出端として良好な特性を有している。また、アームの自由振動による周波数成分を除去することにより、流量計測器として十分使用できることが確認できた。
- ②歪式流量計の特徴として、粒径が小さく、流動性のよい粒体の場合は流出量が減少するに従い、滞留の影響が大きくなり、砂においてその傾向が著しく現れた。
- ③物性の異なる二種類の粉粒体を使用し、制御則としてSTRを適用し制御を行った結果、インパクトライ



ン流量計および歪式流量計の両流量計を用いた場合において、設定値変更および外乱に対して、良好な制御結果を得ることができた。

#### 7. 参考文献

- 1) 柴田力, 化学装置, 8(1979), 46
- 2) 和田憲造・早野延男・森岡 弘, 日本機械学会論文集 (C編), 54-497 (1988), 189
- 3) Dugard, L.・Landau I.D., Proc. of 19th IEEE CDC, Albuquerque, (1980), 1132
- 4) Lozano, R.・Landau, I.D., Int. J. Control, 33-2 (1981), 247
- 5) 山本正昭, 日経メカニカル, 2(1989), 28

(平成3年4月15日受理)