

# スクリーコンベアの充満率制御

和田 憲 造\*・羽田野 嘉 文\*\*

## Control of the Filling Ratio in the Screw Conveyor

Kenzo WADA and Yoshihumi HATANO

### Abstract

In the granular transport system composed of a screw conveyor and a hopper, in order to supply the granules quantitatively and transport it efficiently, a outflow rate from the screw conveyor and a filling ratio inside a trough must be controlled at the same time. As the first step, the control of the filling ratio is discussed in this paper.

As a control algorithm, generalized predictive control (GPC) method which is useful to a non-minimum phase process with variable dead-time is applied to the screw conveyor process. Moreover GPC algorithm which includes a filter  $1/T(z^{-1})$  is applied to the process. Their control performances are examined. Finally, the following results are obtained through simulations and experiments.

- 1) Good response waves for a set-point change and a disturbance input are obtained and granular materials can be transported under the optimal filling ratio by applying the GPC algorithm to the screw conveyor process.
- 2) By introducing the filter  $1/T(z^{-1})$  into the GPC algorithm, fluctuation of manipulating variable and controlled variable are suppressed.

### 1. 序 論

スクリーコンベア<sup>1)</sup>およびホッパから構成されている粉粒体輸送系において、粉粒体の定量供給ならびに効率のよい輸送を実現するためには、スクリーコンベアの流出量とトラフ内の充満率を同時に制御することが必要となる。本報では、その第一段階として、充満率制御について検討を行った。

スクリーコンベアで粉粒体を輸送する場合、輸送効率の面から充満率が最適の状態<sup>2)</sup>で輸送することが望ましい。しかし、充満率を直接または連続的に検出することは不可能である。一方、スクリー軸のトルクはトラフ内の充満状態に比例する量として考えられる。したがって、トルクと充満率の関係がわかれば、これ

をもとにスクリーコンベア内部の充満状態を制御することが可能である。このとき、ホッパの流入量が一定であれば、トルクは回転数を調節することにより制御することができる。

充満率制御プロセスは最小位相推移系のプロセスであるが、流出量制御プロセスは、大きなむだ時間（輸送時間）を持ち、非最小位相推移系プロセスである。したがって、充満率と流出量の同時制御における制御方式としては、未知で時変のむだ時間を持つプロセスおよび非最小位相推移系プロセスに対して有効とされている一般化予測制御方式（GPC）の適用が考えられる。そこで充満率制御においてもGPC制御方式を適用し、シミュレーションおよび実験により、その制御性能について検討を行った。さらに、GPCアルゴリズムにフィルタの役目を果たす設計多項式  $T(z^{-1})$  を導入し、その制御性能についても検討を行った。

\*機械工学科

\*\*大学院生産機械工学専攻

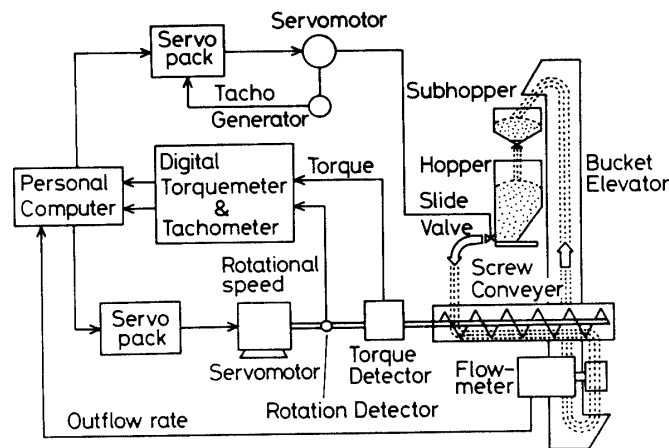


Fig. 1 Experimental apparatus.

## 2. 実験装置

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。装置はスクリーコンベア、インパクトライン流量計、トルク検出器、回転検出器、サーボモータ、ホッパ、スライドバルブ、バケットエレベータおよびパーソナルコンピュータ等から構成されている。

スクリーコンベアへの流入量はホッパ側面のスライドバルブによって調節され、スクリー軸のトルクおよび回転数は、それぞれトルク検出器、回転検出器により検出されている。また、スクリー軸の回転数はパーソナルコンピュータにより制御されている。

## 3. スクリューコンベアの輸送状態

### 3. 1 充満率<sup>5)</sup>

スクリーコンベア内に、粉粒体がどの程度充満しているかを表わす量として充満率  $\phi$  [%] が用いられる。充満率は次式で定義される。

$$\phi = \frac{\text{輸送量 } Q_{T1}}{\text{最大輸送量 } Q_{T1\max}} \times 100 \quad (1)$$

上式における輸送量  $Q_{T1}$  はスクリー各回転毎に算出される量である。したがって、これをもとに連続的に充満率を算出することは不可能である。一方、定常状態においては、スクリー軸のトルクは輸送材の充満状態を表わしており、このトルクの値を制御量として用いることにより、充満率の制御を行うことができる。Fig. 2 に定常状態における充満率  $\phi$  とトルク  $T$  の関係

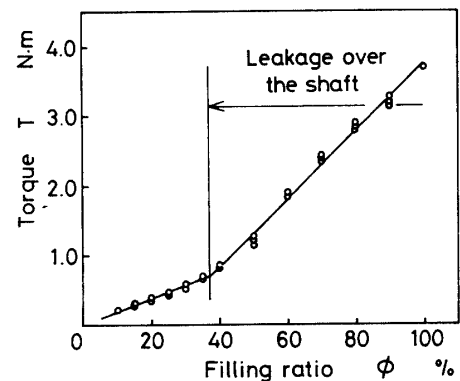


Fig. 2 Relation between the filling ratio and the torque of shaft.

を示す。 $\phi$  と  $T$  の関係は  $\phi = 37$  [%] 付近に折れ点を持つ 2 本の直線で表わされ、この折れ点付近で輸送材のシャフト漏れ現象<sup>5)</sup>により漏れ量が急激に増加する。シャフト漏れは輸送効率の低下の原因となるため、シャフト漏れの起こる前の充満率 (37.5%) を最適充満率とする。したがって、最適充満状態に相当するトルクを Fig. 2 より求め、トルクがこの値を維持するように制御を行う。

(1) 式における輸送量  $Q_{T1}$  は、定常状態において次式のように定義される。

$$Q_{T1} = \frac{7 \cdot 60 \cdot Q_{in}}{N}$$

ここで  $N$  は、スクリーの回転数である。上式を(1)

式に代入すると、充満率は次のように表わせる。

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{7 \cdot 60 \cdot Q_{in}}{Q_{T1max} \cdot N} \\ &= c \cdot \frac{Q_{in}}{N} \end{aligned} \quad (2)$$

上式より、定常状態においては、流入量が一定のとき充満率は回転数  $N$  の関数として表わされるが、後述するシミュレーションにおいては、上式が過渡状態の場合にも成り立つとし、回転数が変化した場合の充満率も近似的に上式より求めることとした。ここで、 $c$  は最大輸送量  $Q_{T1max}$  により決定される定数である。本実験では  $Q_{T1max}$  を、スクリーブレードがほぼ埋まった状態で、円滑な輸送が可能であるときの最大の輸送量とし、流入量  $Q_{in}=4$  [N/sec]、回転数  $N=30$  [rpm] のときの輸送量とした。

### 3. 2 定常輸送状態

スクリーコンベアの定常輸送状態におけるトルクの測定波形を Fig. 3 に示す。図は最適充満率37.5%のときの波形を示している。このときホッパからの流入量は3N/secで、スクリー軸の回転数は60rpmである。図より、実際のトルクの波形は若干変動しているが、この理由として、ホッパからの流入量の変動、流出量の脈動などが考えられる。

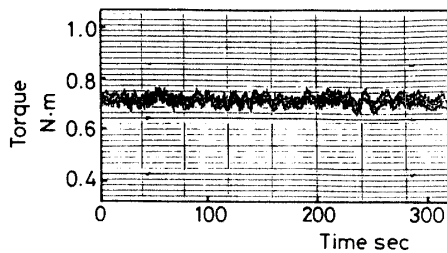


Fig. 3 Measured wave of the torque.

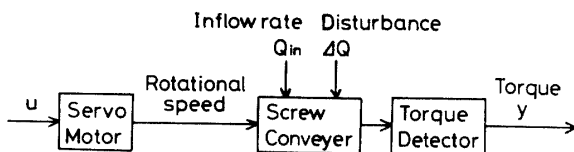


Fig. 4 Block diagram of the process.

### 4. 制御対象のモデリング

制御対象のブロック線図を Fig. 4 に示す。制御対象はサーボモータ、スクリーコンベア、トルク検出器により構成されている。図において  $Q_{in}$  はスクリーコンベアへの流入量、 $\Delta Q$  はスクリーコンベアに入る外乱を表わしている。

G P C 制御方式を適用する上で、制御対象のモデルが必要となる。充満率の制御においては、スクリー内部の輸送機構が複雑なため、回転数とトルクの間関係を定量的に求めることは困難である。そこで、同定によりプロセスモデルを求めることとした。

回転数がステップ状に変化するとき、トルクは2次遅れ的に変化する。そこで、プロセスを次式で表わされる2次のARMAモデルで近似した。

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k-1) \quad (3)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1}$$

パラメータは最小2乗推定法を用いて同定した。このとき流入量は一定とし、スクリー軸回転数を入力、トルクを出力とした。

入力信号としてM系列信号を用い、サンプリング周期を1.0secとし、周期15のM系列信号を5サンプル連続して使用した。なお、同定には1000個のデータを用いた。

同定実験では、流入量を3N/sec、回転数はM系列信号が"1"の場合に80rpm、"0"の場合には40rpmとなるようにモータの回転数を変化させた。これは、スクリーコンベアの充満状態を最適充満率37.5%をさみ、28.1%から56.2%の間で変化させたことになる。推定したパラメータの収束値を次に示す。

$$a_1 = -0.7846 \quad a_2 = -0.0819$$

$$b_0 = -0.0890 \quad b_1 = -0.0284$$

これらの値より零点は  $z = -0.3185$  となり、 $z$  平面の単位円内に存在することから、充満率制御プロセスのモデルは最小位相推移系であることがわかる。

### 5. 制御方式

スクリーコンベアにおいて粉粒体を効率よく輸送するためには、充満率および流出量を同時に制御することが必要である。流出量制御プロセスは、時変のむだ時間を持ち、非最小位相推移系であることがわかつ

ている。したがって、充満率および流出量の同時制御においては、制御方式として一般化予測制御方式の適用が考えられることから、充満率制御の制御方式としても、一般化予測制御方式<sup>2)3)4)</sup>の適用について検討を行った。

一般化予測制御方式は非最小位相推移系プロセス、開ループ不安定プロセス、時変もしくは未知むだ時間を持つプロセス、未知の次数を持つプロセスなどに対して、従来の制御方式と比べて、より安定な制御を行うことができることが確かめられている。<sup>2)4)</sup>

5. 1 一般化予測制御方式

プロセスの入出力関係は次式で表わされる。

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + e(k)/\Delta \quad (4)$$

ここで、

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{na}z^{-na}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{nb}z^{-nb}$$

$e(k)$ は平均値零の白色雑音、また  $\Delta = 1 - z^{-1}$ である。 $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ の次数はそれぞれ  $n_a = 2$ 、 $n_b = 1$ とした。

現時刻  $k$  より  $j$  時刻先の予測値  $\hat{y}(k+j)$  を求めるために、次の恒等式を満足する  $E_j(z^{-1})$  と  $F_j(z^{-1})$  を求める。

$$1 = E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-j}F_j(z^{-1}) \quad (5)$$

ここで、 $E_j(z^{-1})$ 、 $F_j(z^{-1})$ の次数はそれぞれ  $j-1$ 、 $n_a$  とする。

次に、(4)式の両辺に  $E_j(z^{-1})z^j$  をかけ、(5)式を用いて整理すると、(6)式を得ることができる。ただし、雑音の未来項  $e(k+j)$  を零としている。

$$\hat{y}(k+j) = G_j(z^{-1})\Delta u(k+j-1) + F_j(z^{-1})y(k) \quad (6)$$

ここで、

$$G_j(z^{-1}) = B(z^{-1})E_j(z^{-1}) \quad (7)$$

上式は、(5)式を用いて次のように書くことができる。

$$G_j(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})\Delta} - z^{-1} \frac{B(z^{-1})F_j(z^{-1})}{A(z^{-1})\Delta} \quad (8)$$

すなわち、 $G_j(z^{-1})$ の最初の  $j$  要素  $z^{-i}$  ( $i=0, 1, \dots, j-1$ )の係数  $g_0, g_1, \dots, g_{j-1}$  はプロセスのステップ応答より求めることができる。

$y(k)$ の時刻  $k$  までの入出力データに基づいた予測値は、

次式のように書き表すことができる。

$$\hat{y}(k+j) = g_0\Delta u(k+j-1) + g_1\Delta u(k+j-2) + \dots + g_{j-1}\Delta u(k) + f(k+j) \quad (9)$$

ここで、

$$f(k+j) = z^{j-1} [G_j(z^{-1}) - g_0 - g_1z^{-1} - \dots - g_{j-1}z^{-j+1}] \times \Delta u(k) + F_j(z^{-1})y(k) \quad (10)$$

上式より  $f(k+j)$  は現時刻において計算可能な項である。

目標値を  $w(k)$  とするとき制御目的は次の評価関数を最小にするような制御入力  $\Delta u(k)$  を求めることにある。

$$J(N_1, N_2, NU) = \sum_{j=N_1}^{N_2} (\hat{y}(k+j) - w(k+j))^2 + \sum_{j=1}^{NU} \lambda(j) (\Delta u(k+j-1))^2 \quad (11)$$

ここで、 $N_1, N_2$  はそれぞれ最小評価予測範囲、最大評価予測範囲である。また、 $NU$  は制御範囲で、予測範囲  $N_2$  内で求める入力刻み変化  $\Delta u$  の数であり、 $j > NU$  に対して  $u$  は一定すなわち  $\Delta u(k+j-1) = 0$  と仮定する。そして  $\lambda(j)$  は制御重み数列である。

(11)式の評価関数  $J$  を最小にする  $u(k)$  は、次式で与えられる。

$$\Delta u(k) = [1 \ 0 \ \dots \ 0] (G^T G + \Lambda)^{-1} G^T (w - f) \quad (12)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$

ここで、

$$\Lambda = \text{diag}[\lambda(k+N_1), \lambda(k+N_1+1), \dots, \lambda(k+N_2)]$$

$$w^T = [w(k+N_1), w(k+N_1+1), \dots, w(k+N_2)]$$

$$f^T = [f(k+N_1), f(k+N_1+1), \dots, f(k+N_2)]$$

$$G = \begin{bmatrix} g_{N_1-1} & g_{N_1-2} & \dots & g_0 & 0 & 0 \\ g_{N_1} & g_{N_1-1} & \dots & & g_0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & & & g_0 \\ g_{N_2-1} & g_{N_2-2} & \dots & \dots & & g_{N_2-NU} \end{bmatrix}$$

むだ時間が正確にわかっているならば  $N_1$  はむだ時間経過の時点に取られ、 $L$  が未知または変化する場合には  $N_1 = 1$  に取られる。 $N_2$  はプロセスの立ち上がり時間と一致するような値を目安とする。 $NU$  は簡単なプロセスでは 1、複雑なプロセスでは大きめの値にとる。また、 $NU = 1$  とすると、(12)式の逆行列の演算がスカラ計算で済むことから、計算上非常に簡単になる。いずれにしても良い制御性能を得るには、これらの値はプロセスの特性に応じて決められる。<sup>2)</sup>

5. 2 設計多項式  $T(z^{-1})$ <sup>3)</sup>

Fig. 2 からわかるように、トルクの測定波形はかなり変動している。そこでGPCアルゴリズムに、フィルタ  $1/T(z^{-1})$  を導入し、このアルゴリズムにより制御を行う。

(5) 式の恒等式を、次のように書き表す。

$$T(z^{-1}) = E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-j}F_j(z^{-1}) \quad (13)$$

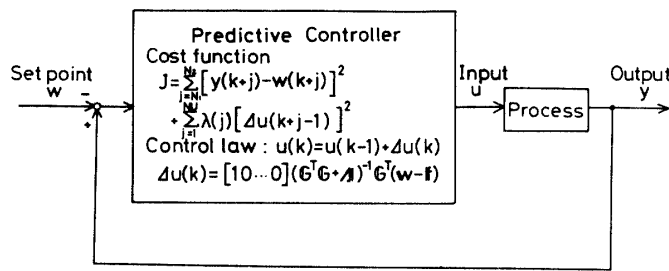


Fig. 5 Block diagram of the control system.

上式を用いると、

$$\hat{y}(k+j | k) = G_j \cdot \Delta u(k+j-1) + \Gamma_j \cdot \Delta u^f(k-1) + F_j \cdot y^f(k) \quad (14)$$

ここで、 $y^f$ は $1/T(z^{-1})$ のフィルタを通した量を表わしている。すなわち、

$$\Delta u^f(k+j-1) = \frac{1}{T(z^{-1})} u(k+j-1)$$

$$y^f(k) = \frac{1}{T(z^{-1})} y(k)$$

となる。

$T(z^{-1})$ を用いた場合の最適入力  $u(k)$  は、5.1で述べた最小化手順方法と同様にして、求めることが可能である。また、設計多項式  $T(z^{-1})$  はほとんどの場合の適用において固定された1次の多項式とされ、 $1/T(z^{-1})$  はローパスフィルタの役割を果たしている。

## 6. スクリューコンベアの充填率制御

### 6.1 制御系の構成

Fig. 5に制御系のブロック線図を示す。充填率の制御は、スクリー軸トルクを検出し、スクリーコンベア内部の充填状態がホッパからの流入量の変化に対して最適状態を保つようにスクリー軸の回転数を調節することにより行なわれる。

### 6.2 シミュレーション

まず最初に充填率制御のシミュレーションを行った。スクリーコンベアの充填率が高い場合には粉粒体がスクリーシャフトを飛び越えて漏れる現象（シャフト漏れ）が生じ、輸送効率低下の原因となる。そこで、シャフト漏れを起こす前の充填率（最適充填率）で制御を行うことにした。

トルクの設定値を $0.51\text{N}\cdot\text{m}$ の輸送状態から、 $0.72\text{N}\cdot\text{m}$ （最適充填率37.5%）へステップ状に変化さ

せ、その応答波形について調べた。また、充填率は(2)式を用いて算出した。ここで、ホッパからの流入量は $3\text{N}/\text{sec}$ とした。

プロセスのパラメータは最小2乗推定法により推定した。なお、実際のプロセスを想定して、平均値零、分散 $4.0 \times 10^{-4} [(\text{N}\cdot\text{m})^2]$ の擬似白色ノイズを制御量に

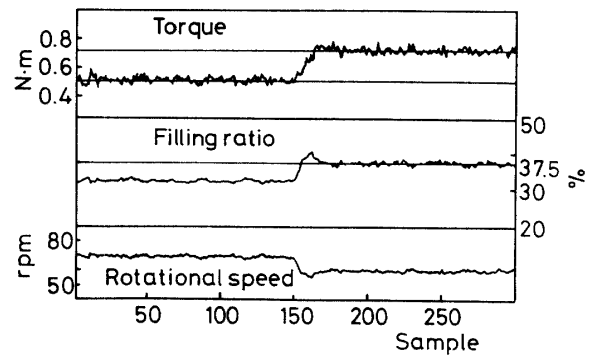


Fig. 6 Response waves of the process (simulation :  $N_1 = 1, N_2 = 5, NU = 1, \lambda = 5$ )

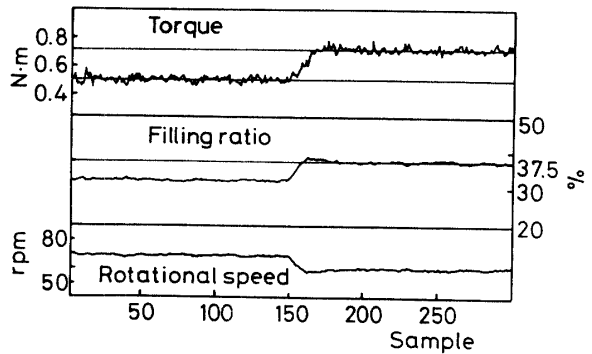


Fig. 7 Response waves of the process (simulation :  $N_1 = 1, N_2 = 5, NU = 1, \lambda = 10$ )

加えてシミュレーションを行った。

一般化予測制御方式における制御パラメータとして最小評価予測範囲を  $N_1=1$ ，最大評価予測範囲を  $N_2=5$ ，制御範囲を  $NU=1$  とした。

Fig. 6 に制御重みを  $\lambda=5$ ，Fig. 7 に  $\lambda=10$  とした場合の応答波形を示す。

Fig. 6，Fig. 7 からわかるように，トルクの波形は  $\lambda$  の値が大きくなると立ち上がりが遅くなるが，オーバーシュートは小さくなる。また，回転数の変動も小さくなっている。トルクの応答波形に比べて充填率の応答波形は若干オーバーシュートを生じているが，トルクの波形と殆ど同様の傾向を示している。したがって，トルクをうまくコントロールできれば，充填率もうまく制御することができる。

Fig. 8 に設計多項式  $T(z^{-1})$  を導入した場合の応答波形を示す。このとき，設計多項式は  $T(z^{-1})=1-0.8z^{-1}$  とした。また制御重みを  $\lambda=5$  とした。同じ制御パラメータを用いた Fig. 7 と比較して，回転数およびトルクにおける変動が明らかに小さくなっており，一般化予測制御則において  $1/T(z^{-1})$  が操作量に対してローパスフィルタとしての役割を果たしていることがわかる。

### 6.3 実験および考察

GPC 制御方式を実プロセスに適用し，充填率の制御実験を行った。この場合，制御条件は制御シミュレーションの場合と同様であるが，実験では100ステップ後（図中矢印の時点A）に設定値変更を行い，200ステップ後（図中矢印の時点B）にホッパからの流入量を3.0 N/sec から4.0 N/sec に突変させた（すなわち1.0 N/sec のステップ状外乱を加えた）。制御パラメータ  $N_1, N_2,$

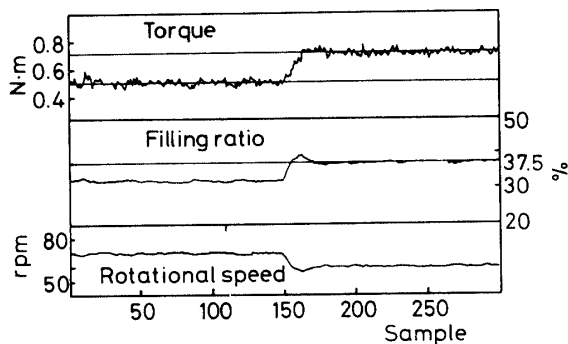


Fig. 8 Response waves of the process by the GPC algorithm with a filter  $1/T(z^{-1})$  (simulation :  $N_1=1, N_2=5, NU=1, \lambda=5$ )

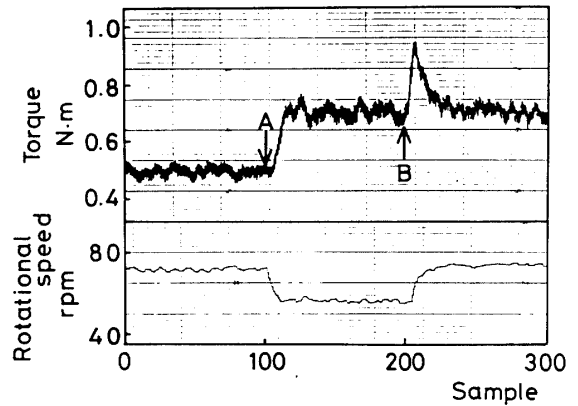


Fig. 9 Response waves of the process (experiment :  $N_1=1, N_2=5, NU=1, \lambda=5$ )

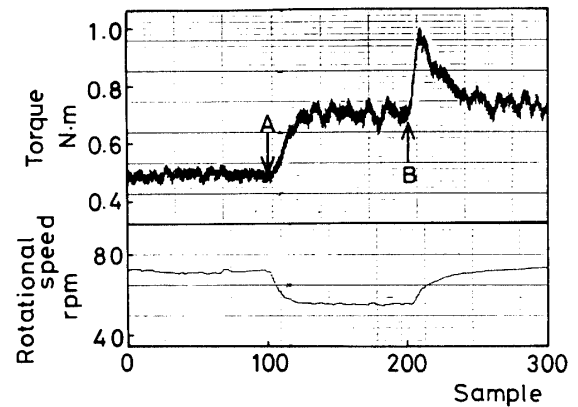


Fig. 10 Response waves of the process (experiment :  $N_1=1, N_2=5, NU=1, \lambda=10$ )

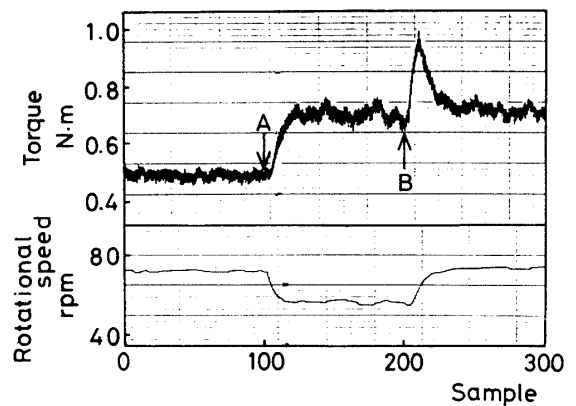


Fig. 11 Response waves of the process by the GPC algorithm with a filter  $1/T(z^{-1})$  (experiment :  $N_1=1, N_2=5, NU=1, \lambda=5$ )

NUの値はシミュレーションと同様である。また、制御重みは $\lambda=5$ として実験を行った。

実験結果をFig. 9に示す。また、Fig. 10に制御重みを $\lambda=10$ として行ったときの実験結果を示す。さらに、設計多項式 $T(z^{-1})$ を導入した場合の実験結果をFig. 11に示す。

設計多項式 $T(z^{-1})$ を導入しない場合は、操作量すなわち回転数が小刻みに変動し、その影響が直接トルクの応答波形に表れ、変動が大きくなっている。また、シミュレーションのときと同様に制御重みを大きくすることにより、ある程度操作量の変動が抑えられるが、設定値変更およびステップ状外乱に対して応答が鈍くなっている。

設計多項式 $T(z^{-1})$ を導入した場合は、応答の遅れをあまり生ずることもなく、操作量の変動を抑えることができ、良好な応答波形となっている。

## 7. 結 論

スクリューコンベアの充満率制御において制御方式として一般化予測制御方式を適用しシミュレーションおよび実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) スクリューコンベア内部の充満状態をスクリュー軸のトルクにより検出し、このトルクをもとに制御を行った結果、設定値変更および外乱入力に対して良好な応答波形を得ることができた。しかし、ホッパーからの流入量の変動やスクリューの回転によりトルクが変動し、結果として回転数(操作量)に小刻みな変動が生じた。
- 2) GPCアルゴリズムにフィルタ $1/T(z^{-1})$ を導入することにより、操作量の変動が抑えられ、良好な応答波形が得られた。

## 参考文献

- 1) 坂下攝：輸送装置，化学装置，17(1~6) (1975)
- 2) D. W. Clarke, C. Mohtadi, P. S. Tuffs : Automatica, 23-2, 137 (1987)
- 3) D. W. Clarke, C. Mohtadi, P. S. Tuffs : Automatica, 23-2, 149 (1987)
- 4) 藤井省三：“デジタル適応制御”，コンピュータロール，コロナ社，No.27, 37 (1989)
- 5) 和田・戎井・早野・櫻本：山口大学工学部研究報告，40-1, 75, (1989)

(平成2年10月15日受理)