スクリューコンベアの内部輸送機構*

和田 憲 造*¹, 戎 井 昌 英*²
樫 本 実*³, 早 野 延 男*⁴

Mechanism of Transportation Inside the Screw Conveyor

Kenzou WADA, Masahide EBISUI,
Minoru KASHIMOTO and Nobuo HAYANO

A screw conveyor is extensively used as transportation equipment for granular materials. Until now, there have been several reports investigating the characteristics of the screw conveyor, the influence of the rotational speed of the screw shaft, the size and the shape of a screw blade and the filling ratio of granules on the transport efficiency of the screw conveyor. However, a study of the transport mechanism of granules has rarely been reported. The transportation mechanism of granular materials inside the screw conveyor is very complicated. In this paper, the transporting state of granules inside the screw conveyor is investigated using two parameters: i. e., the transport quantity and the leakage quantity in the stationary state. First the relationship between the transport quantity and the leakage quantity is examined by measuring them practically. Next, on the basis of the relationship, the difference equation expressing the transporting state is derived, and the transient transporting state of granules is investigated by computer simulation.

Key Words: Screw Conveyor, Transportation Mechanism, Granular Materials Transport Quantity, Leakage Quantity, Filling Ratio

1. 序 論

粉粒体プロセスにおいて、粉粒体の輸送装置は、各装置間を連結するものとして、プロセス全体の自動化には欠くことのできない装置であり、プロセスの中で重要な役割を担っている。したがって、粉粒体輸送プロセスにおいて制御システムを構成する場合、輸送装置の動特性の把握は非常に重要なものとなる。

スクリューコンベアはトラフの中でスクリューを回転させることにより、粉粒体に軸方向の推力を与えて輸送する装置であり、設備費用が安価で広範囲の粉粒体に使用できること、また設置場所が狭くてすむことなどから、古くから粉粒体の輸送装置として多用されている。しかし、スクリューコンベア内部における粉粒体の輸送機構は複雑であるため、その動的挙動を定量的に把握することは困難である。

これまでにもスクリューコンベアについて、いくつかの報告がなされているが、これらは主として所要動力⁽¹⁾⁽²⁾、輸送効率などに関するものであり、輸送機構に関する研究はほとんど報告されていない⁽⁴⁾。

本研究では、まずスクリューコンベアの輸送状態を観察し、スクリューコンベア内部の輸送状態を輸送量と漏れ量を用いて表すことにより、各回転ごとの粉粒体の挙動を表す差分方程式を求めた。さらに、これをもとに輸送状態のシミュレーションを行い、スクリューコンベアの輸送機構について検討を行った。

2. 実験装置概要

実験装置の概略図を図1に示す。本実験装置はスクリューコンベア、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。ホッパから流出した粉粒体はスクリューコンベアで水平に輸送され、その後バケットエレベータを通してサブホッパに戻される。ホッパからの流出量はホッパ側面のスライドバルブの開度により調節され、またスクリューコンベアの流出量はインパクトライン流量計⁽³⁾により検出される。さらに、スクリュ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。操作端であるサーボモータ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。

* 原稿受付 平成2年5月22日。

¹ 正員、山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台)。² 鐘ヶ淵化学工業(株) (〒676 高砂市高砂町宮前町1-8)。³ アイシン精機 (〒448 刈谷市朝日町2-1)。⁴ 正員、東京理科大学山口短期大学 (〒756 小野田市大学通り)。

スクリーコンベアとしてはU形トラフおよび標準形スクリーを使用した。その仕様を表1に示す。なお、実験では粉粒体として平均粒径 317 μm 、見掛け密度 1.37 g/cm³、安息角 36.1 deg の砂を用いた。

3. スクリューコンベア内の粉粒体の輸送状態⁽⁴⁾

まず、スクリーコンベア内部の粉粒体の輸送状態について考える。輸送状態において、スクリー1ピッチに充填している粉粒体をスクリー上方からみた図を図2に示す。図に示されているようにスクリーコンベアで粉粒体を輸送する場合、トラフ内の粉粒体はその輸送状態により、三つの部分に分けることができる。すなわち、一つはスクリーブレードの前面にあって輸送に直接関係している輸送部 (transport)、次に1ピッチ前方のスクリーとトラフのすきまから漏れてくる漏れ部 (leakage)、さらにトラフの底に溜って輸送に関与しない静止部 (dead zone) の三つの部分に分けられる。このうち輸送部と漏れ部はスクリーコンベアの輸送機構を考える上で非常に重要な量となる。また、これらの量はスクリーコンベアの充填率によっても大きく左右される。本章ではこれらの量について検討を行い、その相互関係を実験的に調べる

表1 スクリューコンベアの仕様

Screw	length	525mm
	blade diameter	114mm
	pitch	75mm
	P/D	0.66
	number of pitch	7
	material	nylon
Trough	clearance	10mm
	inner diameter	134mm
	material	stainless steel

図1 実験装置概略図

ことにより、スクリーコンベアの輸送状態を明らかにする。

3・1 静止量 スクリューコンベアの運転中に粉粒体の流入を中断すると、流出量は次第に少なくなり、最終的には流出しなくなる。しかし、このときスクリーとトラフ底部の間にはある量の輸送材が輸送されずに残る。この残った量を静止量と呼ぶ。静止量は、スクリーコンベアの運転中、輸送量ならびに漏れ量に関係せず一定である。すなわち、静止量はスクリーコンベアの内部輸送機構に関与しない量である。

3・2 輸送量 スクリューコンベア内に存在する輸送材は、各ピッチごとにそれぞれのスクリーブレードによって軸方向の推力を受ける。輸送量とは、そのブレードによる推力を受け、ブレードの回転とともにトラフの排出口方向に進行する粉粒体の量である。定常状態においては、スクリー軸1回転当たりの流出量は、その最終ピッチの輸送量と考えることができる。

今、スクリーコンベアの i 番めのピッチにおける輸送量を Q_{i1} (今回使用したスクリーは7ピッチであるので $i=1\sim7$) とすると、全輸送量 Q_{T1} は各ピッチごとの輸送量の総和として次式のように表される。

$$Q_{T1} = \sum Q_{i1} \dots\dots\dots (1)$$

定常状態においては各ピッチの輸送量が等しいことより、 Q_{i1} を Q_1 (定常状態における1ピッチ当たりの

(a) 正面図

(b) A-A断面図

図2 スクリュー1ピッチの砂

輸送量)で代表させると、 Q_1 は流入量 Q_{in} とスクリー軸の回転数 N を用いて次式のように求まる。

$$Q_1 = 60 \cdot Q_{in} / N \quad \dots\dots\dots (2)$$

したがって、定常状態における全輸送量 Q_{T1} は次式のように表される。

$$\begin{aligned} Q_{T1} &= 7 \cdot Q_1 \\ &= 7 \cdot 60 \cdot Q_{in} / N \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

3.3 漏れ量 スクリューコンベアで粉粒体を輸送する際、ブレードの前面にある輸送材はすべて運ばれるわけではなく、輸送材の一部はスクリーとトラフのすきまから漏れたり(すきま漏れ)、高い充满状態ではシャフトを飛び越えて漏れる(シャフト漏れ)という現象が生じる。このように漏れた輸送材は、スクリーからみれば全く出口方向に進んでいないため、輸送効率の低下の原因となる。漏れ量は、1ピッチ中に含まれる輸送材から輸送量を差し引いた量として求めることができる。

スクリーコンベア内の輸送材の重量を Q_T とする。この Q_T の内、全輸送量を Q_{T1} 、全漏れ量を Q_{T2} とすると1ピッチ当たりの漏れ量 Q_2 は次式のようになる。

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_{T2} / 7 \\ &= (Q_T - Q_{T1}) / 7 \\ &= (Q_T - 7 \cdot 60 \cdot Q_{in} / N) / 7 \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

今、定常状態で輸送されているスクリーコンベアにおいて、粉粒体の供給を瞬間的に停止する。同時にその流出量を容器に受け止め、スクリーコンベア内の輸送材を、スクリーを回転させることにより、すべて容器内に流出させる。容器に受け止めた輸送材の重量はその輸送状態における全輸送量 Q_{T1} と全漏れ量 Q_{T2} の和となる。すなわち、この量はスクリーコンベア内の全輸送材の重量 Q_T にあたる。測定した Q_T およびそのときの流入量 Q_{in} 、回転数 N より式(4)を

用いて1ピッチ当たりの漏れ量 Q_2 を実験的に求めることができる。

輸送量 Q_1 と漏れ量 Q_2 の関係を図3に示す。図において Q_1 と Q_2 の関係は2.8 N 付近に折れ点を持つ二つの曲線で表される。折れ点を生じる原因としては次のことが考えられる。すなわち実験で使用したスクリーは左巻きであるため、輸送材は低い充满状態においてはブレードの左側の空間に滞留して輸送され、このときの漏れ量は左側のクリアランスからの漏れのみである。しかし、高い充满状態になるとシャフト漏れが生じ始め、輸送材はシャフトを飛び越えてブレードの右側の空間にも充满し始める。これらは1ピッチ後方の輸送量となるが、一部は右側のクリアランスよりさらに漏れるため全体として漏れ量は増大する。このことが $Q_1 = 3.8$ N 付近に折れ点を生じる原因と考えられる。

4. スクリューコンベアの基本的特性

スクリーコンベアの輸送状態は、スクリーコンベアの充满状態(充满率)およびスクリー軸の回転数によって異なる。またスクリーコンベアの充满率は流入量、回転数によって決まる。充满率はスクリー軸のトルクを検出することによって知ることができる。したがって、これらの関係を定量的に把握し、その基本的特性を明らかにすることができれば、スクリーコンベアの輸送状態を把握する上で非常に重要なものとなる。

図4にスクリーコンベアで粉粒体が輸送されているときの、定常状態における流出量および軸トルクの測定波形の一例を示す。

図はスクリーコンベアへの流入量を3 N/s、回転数を60 rpmとしたときの定常状態における流出量および軸トルクの変動の様子を示したものである。上図

図3 輸送量と漏れ量の関係

図4 流出量および軸トルクの測定波形

が流出量, 下図がトルクを表している。流出量およびトルクともスクリーの回転周期で脈動しているのがわかる。その周期および大きさは回転数ならびに充填状態により異なる。

4・1 充填率とトルクの関係 スクリューコンベア内に粉粒体がどの程度充填しているかを表す量として、次式で表される充填率 ϕ が用いられる。

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

$$= \frac{7 \cdot 60 \cdot Q_{in}}{Q_{T1\max} \cdot N} \times 100 = C \frac{Q_{in}}{N} \dots\dots\dots (5)$$

ここで C は最大輸送量 $Q_{T1\max}$ により決定される定数である。本実験では $Q_{T1\max}$ 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輸送量とし、流入量 $Q_{in}=4 \text{ N/s}$, 回転数 $N=30 \text{ rpm}$ のときの輸送量とした。

充填率 ϕ とトルク T の関係を図5に示す。ここで、 T は定常状態におけるトルクの平均値である。 ϕ と T の関係は $\phi=37\%$ 付近に折れ点を持つ2本の直線で表される。この折れ点は輸送材のシャフト漏れ現象により生じるもので、シャフト漏れによりスクリーコンベア内の全輸送材の重量 Q_T が増加し、スクリーブレードに加わる負荷が大きくなるためである。

充填率 ϕ は式(5)からわかるように流入量 Q_{in} に比例し、回転数 N に反比例する。そこで、次に各流入量における回転数とトルクの関係について調べた。

4・2 回転数とトルクの関係 図6に流入量をパラメータとしたときのスクリー軸の回転数とトルクの関係を示す。図より回転数が増加するに従ってトルクは急激に減少する。また流入量が大きいほどトルクは大きくなる。

5. スクリューコンベアの輸送機構の解明

スクリーコンベアの輸送状態を調べるために、過

渡状態における輸送量 Q_1 および漏れ量 Q_2 の変化についてシミュレーションにより検討を行った。

5・1 過渡状態における輸送量と漏れ量 各ピッチ輸送量 Q_1 , 漏れ量 Q_2 は過渡状態においてはそれぞれ異なるため、次のように表すことにする。

$Q_1(i, j)$: j 回転めに i 番めのスクリーが運ぶ輸送材の重量

$Q_2(i, j)$: j 回転めに i 番めのピッチから漏れ、そのまま i 番めのピッチに取り残される輸送材の重量

$Q_w(i, j)$: j 回転めに i 番めのピッチ内に存在する輸送材の重量

$Q_w(i, j)$ は $(j-1)$ 回転めに $(i-1)$ 番めのピッチが輸送した輸送量 $Q_1(i-1, j-1)$ と $(j-1)$ 回転めに i 番めのピッチから漏れ、そのピッチに残った漏れ量 $Q_2(i, j-1)$ の和として次式で表される。

$$Q_w(i, j) = Q_1(i-1, j-1) + Q_2(i, j-1) \dots\dots\dots (6)$$

次に、 $Q_w(i, j)$ より $Q_2(i, j)$ を求めるために、次式で示される量 $K(i, j)$ を考える。

$$K(i, j) = Q_2(i, j) / Q_w(i, j) \dots\dots\dots (7)$$

$K(i, j)$ は、 i ピッチ中に存在する輸送材に対する漏れ量の割合を表している。また式(6), (7)より $Q_1(i, j)$, $Q_2(i, j)$ はそれぞれ次式のように表すことができる。

$$Q_1(i, j) = (1 - K(i, j)) Q_w(i, j) \dots\dots\dots (8)$$

$$Q_2(i, j) = K(i, j) Q_w(i, j) \dots\dots\dots (9)$$

式(7)における $K(i, j)$ の値はこのままでは求めることはできない。一方、定常状態では各ピッチ内の輸送材の量は一定であり、1ピッチ内の輸送材の重量 Q_w は $Q_w = Q_T/7$ と考えることができる。すなわち定常状態における K と Q_w の関係は Q_T を測定することにより実験的に求めることができる。この関係を図7に示す。そこで図7を用いて $Q_w (=Q_w(i, j))$ に相当する K の値を求め、この値を $K(i, j)$ として輸送状態のシミュレーションを行った。

図5 充填率とトルクの関係

図6 回転数とトルクの関係

また、式(6)、(8)、(9)より i 番めのピッチ内に存在する輸送材の重量を状態変数 x_i にとると、各回転ごとのスクリーコンベア内の輸送状態は次の状態推移方程式で表される。

$$\begin{aligned} x(i+1) &= Px(i) + qu(i) \\ y(i) &= cx(i) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし

$$P = \begin{pmatrix} K_1 & 0 & \dots\dots\dots 0 \\ (1-K_1) & K_2 & \dots\dots\dots 0 \\ 0 & (1-K_2) & \dots\dots\dots 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots\dots\dots 0 & (1-K_6) & K_7 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$q^T = (1 \ 0 \ \dots\dots\dots 0), \quad c = (0 \ \dots\dots\dots 0 \ 1-K_7)$$

上式が各回転ごとの粉粒体の挙動を表す差分方程式となる。上式をブロック線図表示したものを図8に示す。ここで K_i ($i=1\sim 7$) は i 番めのピッチにおける各回転ごとの輸送材に対する漏れ量の割合を表しており、前述の $K(i, j)$ を各ピッチごとに書き表したものである。すなわち $K_i = K(i, j)$ ($i=1\sim 7$) である。また、定常状態においては $K_i = K$ となる。図より各ピッチの粉粒体が一部は漏れ量として後方へ、他は輸送量として次段のピッチに輸送されている様子がよくわかる。式(8)～(10)を用いることにより、各回転ごとのスク

図7 K と Q_w の関係

図8 ブロック線図

リーコンベア内の輸送量、漏れ量を逐次計算することができる。

5.2 輸送状態のシミュレーション 流入量にステップ変化を与えた場合のスクリーコンベアの流出量波形を図9に示す。また図10に回転数にステップ変化を与えた場合の流出量波形を示している。それぞれの図において実線は流量計で検出された実測値（瞬間流出量）、破線はそのときの平均流出量、○印はスクリーコンベアの流出量の計算値であり、各ピッチの輸送量と漏れ量の過渡的な変化を逐次計算したときの、7ピッチめの輸送量 $Q_1(7, j)$ を示している。図より実際のスクリーコンベアの流出量は脈動しているが、その平均流出量はシミュレーションによる計算値とよく一致しているのがわかる。したがって、このシミュレーション方法は式(7)の $K(i, j)$ あるいは式(11)の K_i として、定常状態における K の値を用いているにもかかわらず、スクリーコンベアの過渡的な輸送状態を良く表しているといえる。図9において流入量にステップ変化を与えた時点から流出量として排出され

図9 流入量のステップ変化に対する応答

図10 回転数のステップ変化に対する応答

図 11 流入量のステップ変化に対する応答
(各ピッチごとの回転回数に対する変化)

図 13 回転数のステップ変化に対する応答
(各ピッチごとの回転回数に対する変化)

図 12 流入量のステップ変化に対する応答
(各回転ごとの各ピッチにおける変化)

図 14 回転数のステップ変化に対する応答
(各回転ごとの各ピッチにおける変化)

るまで、有効ピッチ数である 7 ピッチ分の輸送時間（むだ時間）が存在するが、これがシミュレーションにもよく表れている。

図 11、図 12 は流入量をステップ的に変化させた場合の回転回数ごと、各ピッチごとの輸送量と漏れ量の変化を示したものである。また図 13、図 14 は回転数をステップ的に変化させた場合の輸送量と漏れ量の変化を示したものである。図 11、図 12 よりスクリーコンベア内の粉粒体は、回転回数の増加とともにスクリーコンベア内を順次流出側に輸送され、最終的には定常状態に落ちついている様子がよくわかる。

図 13、図 14 は、流入量を一定として回転数にステップ変化を与えた場合であり、回転回数の増加について粉粒体は高充填状態から低充填状態に変化しながら輸送されている状態がよくわかる。両図において有効ピッチ数は 7 ピッチであるが、7 回転めで輸送量が一定にならないのは輸送量と漏れ量が相互に影響しあっているためである。したがって、これらの図がスクリーコンベア内部の過渡的な輸送状態をよく表現していることがわかる。

6. 結 論

スクリーコンベア内部の輸送機構を明らかにするために、まずその基本的特性を調べ、次にコンベア内部の輸送状態を輸送量と漏れ量の二つのパラメータを用いて表すことにより、それらの定常状態における関係を明らかにした。さらに、輸送材に対する漏れ量の割合を表す値 K_i あるいは $K(i, j)$ として定常状態における値 K を用いることにより、過渡状態における輸送特性をうまく推定することができ、スクリーコンベア内部の輸送機構を明らかにすることができた。

文 献

- (1) Carleton, A. J., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, May (1969), 329.
- (2) Metcalf, J. R., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, **180**, Pt. 1, No. 6 (1965), 131.
- (3) 和田・早野・森岡, 機論, **54**-497, C (1988), 189.
- (4) Hayano, N., ほか 4 名, *Proceedings of International Symposium on Powder Technology '81*, (1981), 314.