

スクリーコンベアの内部輸送機構

和田 憲造*・戎井 昌英**・早野 延男*・檜本 実***

The Mechanism of Transportation inside the Screw Conveyor

Kenzo WADA, Masahide EBISUI, Nobuo HAYANO and Minoru KASHIMOTO

Abstract

A screw conveyor is extensively used as transport 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 a 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 mechanism of transportation inside the screw conveyor is very complicated. Therefore, it is difficult to understand the dynamic behavior of granules quantitatively. In this paper, in order to grasp the transporting state inside the screw conveyor from phenomenal aspects, it is expressed using two parameters i.e. the transport quantity and the leakage quantity in the stationary state. At first, the relation between the transport quantity and the leakage quantity is examined by measuring them practically. Next, on the basis of the relation, the transient transporting state of granules is investigated by computer simulation.

Finally, the mechanism of transportation inside the screw conveyor becomes clear through the simulation.

1. 序 論

化学工業、食品工業等の製造工程の中には数多くの粉粒体を取り扱うプロセスが存在しており、近年、これらの粉粒体プロセスは大型化さらには連続・自動化の傾向をたどりつつある。その中で粉粒体の輸送装置は、各装置間の連続・自動化には欠くことのできない装置である。

粉粒体輸送系プロセスにおいて、輸送装置を含む制御システムを構成する場合、その動特性の把握が非常に重要なものとなる。²⁾スクリーコンベアはトラフの中でスクリ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の利点があり、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、粉粒体の物性が複雑であり、またスクリーコンベア内部の輸送機構が複雑であるため、その動的挙動を定量的に把握することは困難である。これまでもスクリ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、輸送効率等に関するものであり、輸送機構に関する研究は殆ど報告されていない。そこで、本研究では、まずスクリーコンベアの輸送機構を現象面からとらえ、スクリーコンベア内部の過渡的な輸送状態を定常状態における輸送量と漏れ量を用いて表わし、これをもとに輸送状態のシミュレーションを行うことによりスクリーコンベアの動特性を明らかにするものである。

* 生産機械工学科

** 大学院生産機械工学専攻

*** 現在アイシン精機株式会社

2. 実験装置概要

実験装置の概略図を Fig.1に示す。本実験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、回転検出器およびパーソナルコンピュータ等から構成されている。ホップから流出した粉粒体はスクリ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プに戻される。ホップからの流出量はホップ側面のスライドバルブにより調節される。スクリーコンベアからの流出量はインパクトライン流量計により検出される。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。また操作端であるV S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。

スクリーコンベアとしてはU形トラフおよび標準型スクリーを使用した。スクリーコンベアの仕様を Table 1 に示す。

なお、粉粒体として平均粒径 $317\mu\text{m}$ 、見掛け密度 1.37 g/cm^3 、安息角 36.1deg の砂を用いた。

3. 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、スクリーコンベアへの流入量およびスクリー軸の回転数によって大きく変化する。またスクリーコンベアの輸送時における充満状態は流入量、回転数によって変化し、流出量にも直接影響を与える。この充満状態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。

従って、それらの関係を調べ、その基本的特性を明らかにすることは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ことである。そこで、これらの関係について実験的に検討を行った。

3.1 回転数とトルクの関係

Fig.2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したが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っていることがわかる。

Table 1 Specification of screw conveyer

スクリー	有効長さ	525 mm
	羽根径	114 mm
	ピッチ	75 mm
	ピッチ比	0.66
	ピッチ数	7
	材質	ナイロン
トラフ	クリアランス	10 mm
	内径	134 mm
	材質	ステンレス鋼

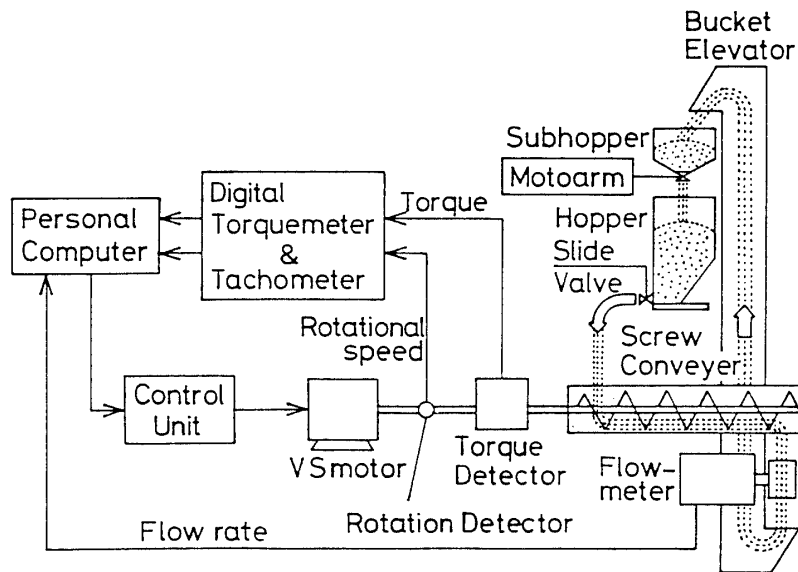


Fig. 1 Experimental apparatus

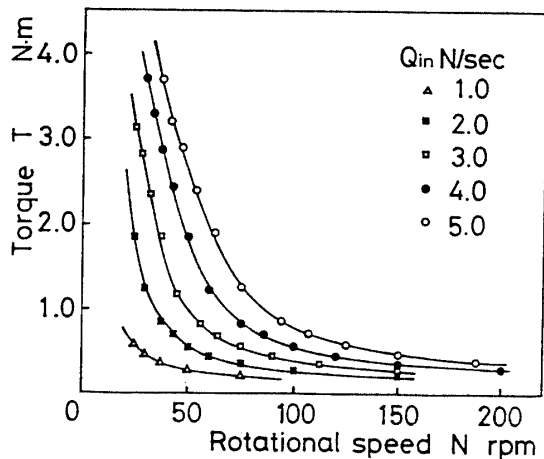


Fig. 2 Relation between the rotational speed and the torque

3.2 流出量およびトルクの過渡特性

Fig.3, Fig.4には、それぞれ流入量および回転数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とトルクの時間的変化を示す。両図においてスクリーコンベアの流出量波形はスクリー軸の回転周期で脈動しており、その変動幅はトラフ内の充満状態によって異なる。すなわち、高い充満状態では変動幅は大きく、低い充満状態では変動幅は小さくなる。また流入量を変化させた場合、トルクは流入量にステップ変化を与えた時点から増加していくが、流出量はある一定時間経過した後変化している。この時間は流入量に変化してから流出量として排出されるまでのスクリーコンベアによる輸送時間を表わしており、この輸送時間はそのときのスクリー軸の回転数によって決まるものである。回転数を変化させた場合、流出量、トルクとも直ちに变化し始め、トルクは、回転数にステップ変化が与えられた時点から減少していく。

4. スクリューコンベアの輸送状態

ここでは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。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運動状態から静止量、漏れ量、輸送量に分けることができる。それらのうち輸送量と漏れ量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、それらはスクリーコンベアの充満率によって大きく左右される。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。

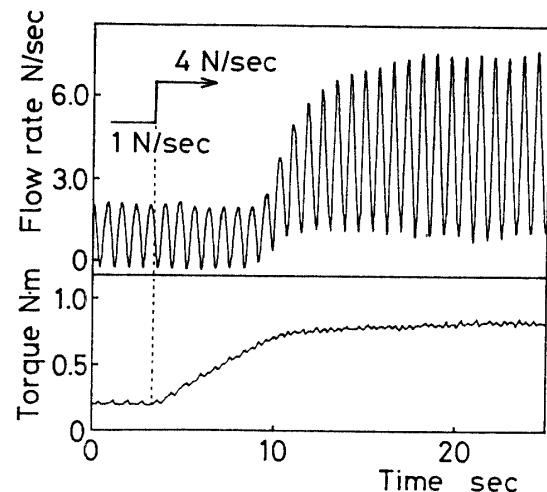


Fig. 3 Transient response waves of the outflow rate and the torque for the step change of the inflow quantity ($Q_{in}=1 \rightarrow 4$ N/sec, $N=75$ rpm)

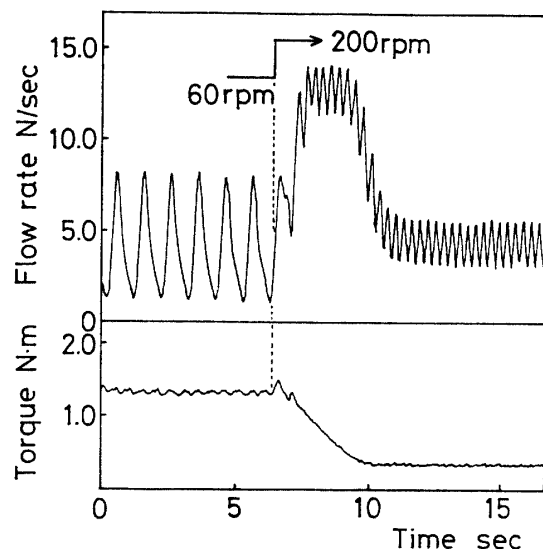


Fig. 4 Transient response waves of the outflow rate and the torque for the step change of the rotational speed ($N=60 \rightarrow 200$ rpm, $Q_{in}=4$ N/sec)

4.1 静止量

スクリ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(クリアランス)にはある量の輸送材が輸送されずに残っている。この量を静止量と呼ぶ。静止量は、スクリーコンベアの運転中輸送量、漏れ量に関係せず一定である。従って、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り、後述するスクリーコンベア内の粉粒体の量はすべて静止量を差し引いて求めてある。

4.2 輸送量

スクリ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。従って、スクリー軸1回転あたりの流出量は、その最終ピッチの輸送量と考えることができる。

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

$$Q_T = \sum_{i=1}^7 Q_{T1} \quad (1)$$

定常状態においては各ピッチあたりの輸送量が等しいことより Q_{T1} を $Q_1[N]$ （定常状態における1ピッチあたりの輸送量）で代表させると、 Q_1 は流入量 $Q_{in}[N/sec]$ とスクリー軸の回転数 $N[rpm]$ を用いて次式のように求まる。

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

従って、定常状態における全輸送量は(2)式を用いて次式のように表わされる。

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

4.3 漏れ量

スクリ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間から漏れたり（隙間漏れ）、高い充填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。また漏れ量は輸送量およびスクリーコンベア内の充填状態に大きく影響されるため、スクリーコンベア内部の輸送状態を考える上でその取り扱いが重要となる。

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。今、スクリーコンベア内の輸送材の重量を $Q_T[N]$ とする。この Q_T の内、全輸送量を $Q_{T1}[N]$ 、全漏れ量を $Q_{T2}[N]$

とすると1ピッチあたりの漏れ量 Q_2 は次式のように表わせる。

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

(4)式より漏れ量は実験的に求めることができる。今、定常状態で輸送されているスクリーコンベアへの供給をホッパのバルブを瞬間的に閉じることにより停止する。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。ここで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(4)式を用いて1ピッチあたりの漏れ量 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Fig.5に示す。図において Q_1 と Q_2 の関係は3.8[N]付近に折れ点を持つ2つの曲線で表わされる。これは以下のことが原因と考えられる。すなわち実験で使用したスクリーは左巻きであるため、輸送材は低い充填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、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、高い充填状態になるとシャフト漏れが起こり始め、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填し始める。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

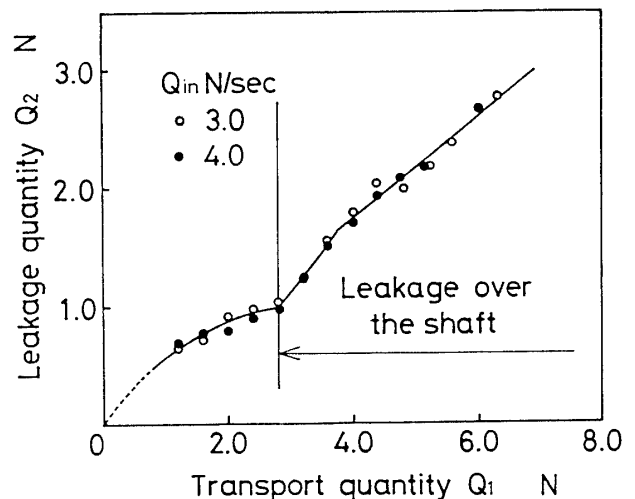


Fig. 5 Relation between the transport quantity and the leakage quantity (Stationary state)

近に折れ点を生ずる原因と考えられる。

4.4 充満率

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次式で表わされる充満率 ϕ [%] が用いられる。

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{\text{輸送量 } Q_{T1}}{\text{最大輸送量 } Q_{T1\max}} \times 100 \\ &= \frac{7 \cdot 60 \cdot Q_{in}}{Q_{T1\max} \cdot N} \times 100 = C \frac{Q_{in}}{N} \end{aligned} \quad (5)$$

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。

充満率 ϕ とトルク T の関係を Fig.6に示す。これより ϕ と T の関係は $\phi = 37$ [%] 付近に折れ点を持つ2本の直線で表わされる。これは輸送材のシャフト漏れ現象により漏れ量がこの付近で急激に増加するためと考えられる。すなわち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。

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を行った。

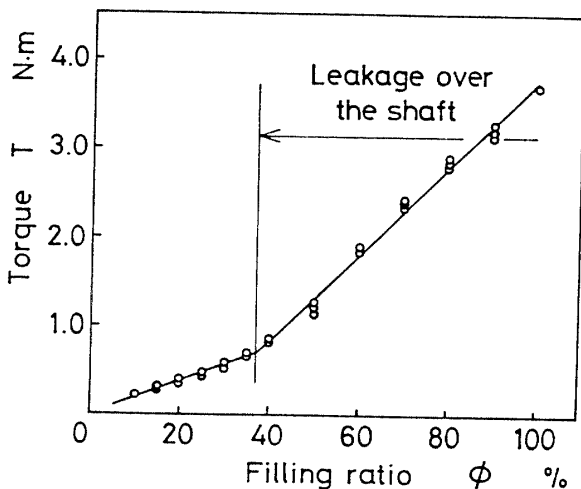


Fig. 6 Relation between the filling ratio and the torque

5.1 過渡状態における輸送量と漏れ量

各ピッチの輸送量 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わすことにする。

$Q_{1i}(J)$: J回転目に i 番目のスクリーが運ぶ輸送材の重量

$Q_{2i}(J)$: J回転目に i 番目のピッチから漏れ、そのまま i 番目のピッチに取り残される輸送材の重量

$Q_{wi}(J)$: J回転目に i 番目のピッチ内に存在する輸送材の重量

$Q_{wi}(J)$ は (J-1) 回転目に (i-1) 番目のピッチが輸送した輸送量 $Q_{1i-1}(J-1)$ と (J-1) 回転目に i 番目のピッチから漏れ、そのピッチに残った漏れ量 $Q_{2i}(J-1)$ の和として次式で表わされる。

$$Q_{wi}(J) = Q_{1i-1}(J-1) + Q_{2i}(J-1) \quad (6)$$

次に、 $Q_{wi}(J)$ より $Q_{2i}(J)$ を求めるために、次式で示される量 $K_i(J)$ を考える。

$$K_i(J) = Q_{2i}(J) / Q_{wi}(J) \quad (7)$$

$K_i(J)$ 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わしている。また(6)、(7)式より $Q_{1i}(J)$ 、 $Q_{2i}(J)$ はそれぞれ次式のように表すことができる。

$$Q_{1i}(J) = \{1 - K_i(J)\} Q_{wi}(J) \quad (8)$$

$$Q_{2i}(J) = K_i(J) Q_{wi}(J) \quad (9)$$

5.2 輸送状態のシミュレーション

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。従って、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 Fig.7に示す。この関係と(8)、(9)式を用いることにより次のようにして輸送状態のシミュレーションを行うこと

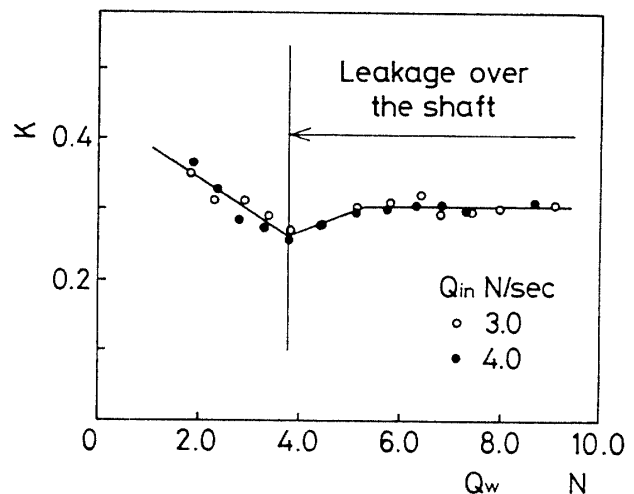


Fig. 7 Relation between K and Q_w (Stationary state)

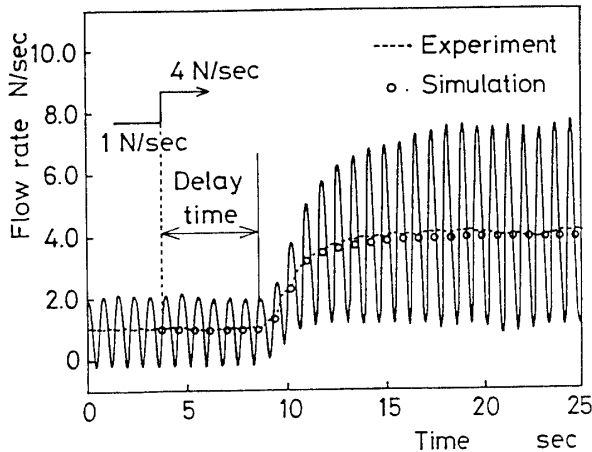


Fig. 8 Transient response waves of the outflow quantity for the step change of the inflow quantity ($Q_{in}=1 \rightarrow 4$ N/sec, $N=75$ rpm)

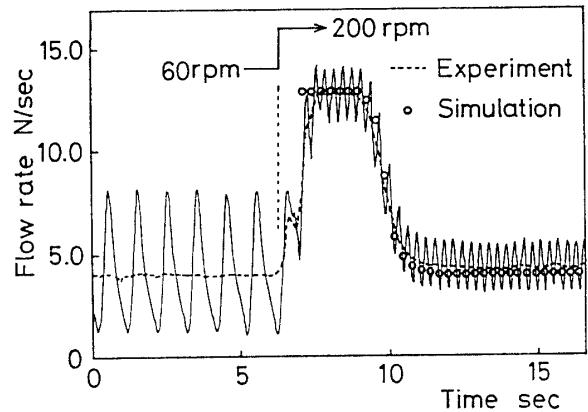


Fig. 9 Transient response waves of the outflow quantity for the step change of the rotational speed ($N=60 \rightarrow 200$ rpm, $Q_{in}=4$ N/sec)

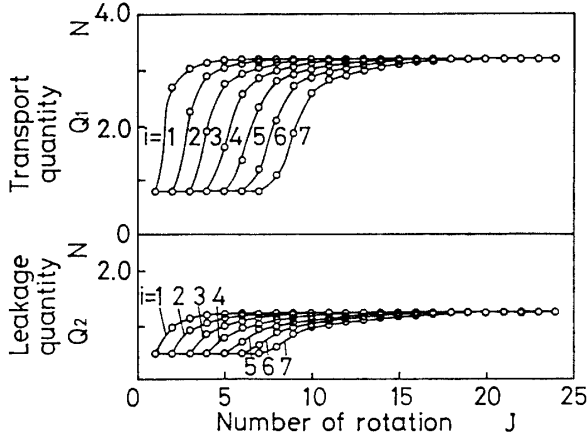


Fig.10 Transient behavior of the transport quantity and the leakage quantity every rotation for the step change of the inflow quantity ($Q_{in}=1 \rightarrow 4$ N/sec, $N=75$ rpm)

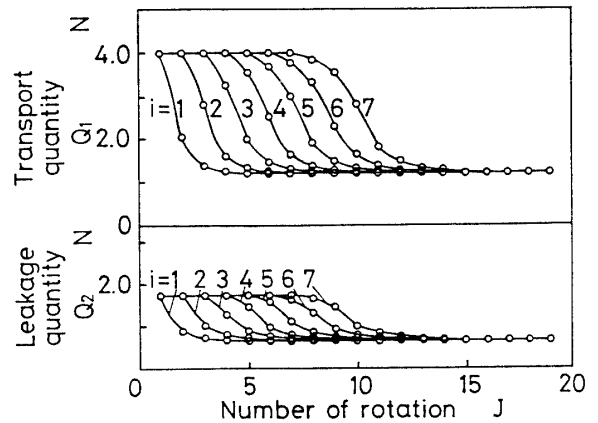


Fig.11 Transient behavior of the transport quantity and the leakage quantity every rotation for step change of the rotational speed ($N=60 \rightarrow 200$ rpm, $Q_{in}=4$ N/sec)

ができる。

- ①ステップ変化前後の回転数と流入量を用いて、それぞれの輸送量を求める。
- ②ステップ変化前の輸送量より定常状態における輸送量と漏れ量の関係(Fig.5)を用いて漏れ量を求め、それぞれ $J=1$ の時の輸送量 $Q_{11}(J)$ 、漏れ量 $Q_{21}(J)$ とする。
- ③ステップ変化後 ($J=2 \sim$)、1番目のピッチにある輸送材の重量 $Q_{w1}(J)$ を(6)式より求め、 K と Q_w の関係(Fig.7)を用いて $K_1(J)$ を決定する。
- ④ $K_1(J)$ 、 $Q_{w1}(J)$ を用いて(8)、(9)式より $Q_{11}(J)$ 、 $Q_{21}(J)$ を決定する。
- ⑤ J 回転後、 i 番目のピッチ内の輸送材の重量 $Q_{wi}(J)$ を(6)式により求め、 K と Q_w の関係を用いて $K_i(J)$ を決定する。

- ⑥ $K_i(J)$ 、 $Q_{wi}(J)$ を用いて(8)、(9)式より $Q_{1i}(J)$ 、 $Q_{2i}(J)$ を決定する。

Fig.8は流入量にステップ変化を与えた場合、Fig.9に回転数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示している。それぞれの図において実線は流量計により実際に検出された値(瞬間流出量)、破線は平均流出量、○印はシミュレーションによるスクリーコンベアの流出量で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ピッチ目の輸送量 $Q_{17}(J)$ 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おり、その平均流出量がシミュレーションによる計算値とよく一致していることがわかる。また、Fig.8において流入量にステッ

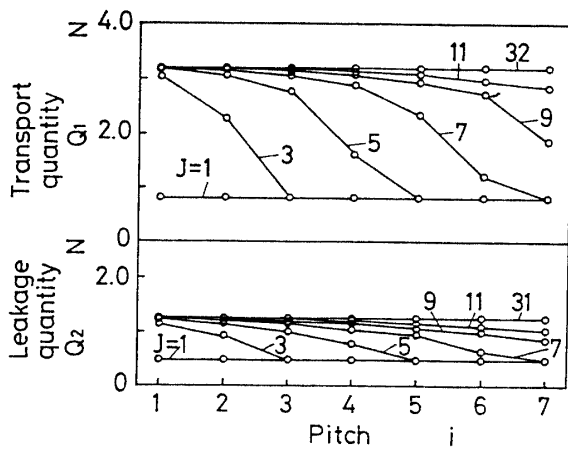


Fig.12 Transient behavior of the transport quantity and the leakage quantity at each pitch for the step change of the inflow quantity ($Q_{in}=1 \rightarrow 4N/sec$, $N=75rpm$)

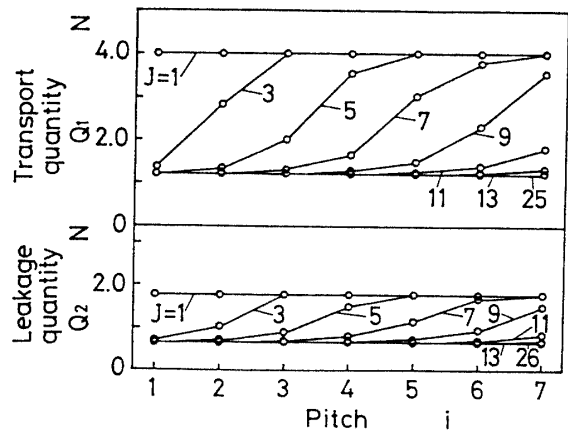


Fig.13 Transient behavior of the transport quantity and the leakage quantity at each pitch for the step change of the rotational speed ($N=60 \rightarrow 200rpm$, $Q_{in}=4N/sec$)

ブ変化を与えた時点から流出量として排出されるまで、有効ピッチ数である7ピッチ分の輸送時間が存在し、これがシミュレーションにもよく表れている。

Fig.10, Fig.11はシミュレーションにより求めた各回転回数における輸送量と漏れ量の各ピッチごとの変化を示している。また Fig.12, Fig.13はシミュレーションにより求めた各ピッチにおける輸送量と漏れ量の各回転ごとの変化を示す。Fig.12より回転数が一定で流入量にステップ変化を与えた場合は、回転回数とともにスクリーコンベアの流入側から流出側に粉粒体が輸送され、最終的には定常状態におちつく過渡的な状態がよくわかる。また、Fig.13より、流入量が一定で回転数にステップ変化を与えた場合には回転回数とともに高充填率から低充填率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回転目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。従って、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2つのパラメータを用いて表わすことにより、それらの定常状態における関係を明らかにした。そして、この関係を用いてスクリーコンベア内部の過渡的な輸送状態についてシミュレーションを行うことによりスクリーコンベアの内部の輸送機構を明らかにすることができた。

7. 参考文献

- 1) 和田・早野・森岡, 機論, 54-497, C, 189(1988)
- 2) N.Hayano et al., Proceedings of International Symposium on Powder Technology '81

(平成元年4月15日受理)