

# 振動ふるいにおける流動層粒子(もみ)の移送速度と もみと玄米の分離特性について\*

岩尾 俊男<sup>\*\*\*</sup>・田辺 一<sup>\*\*</sup>

Toshio IWAO and Hajime TANABE

Flowing Velocity and Screening Character of Flowing Rice  
and Paddy by the Oscillating Screen.

## 1. 結 論

現在、わが国における農業機械で振動機構を選別機に用いているものは比較的少ないが、収穫機械、調製機械らおよび加工機械の大型化あるいは小型高性能化の傾向か、振動機構を有するふるい分け装置が研究されている現況である。また振動ふるいの運動形も円弧状の往復運動形から、次第に慣性力の小さい閉曲線運動形が採用されるようになってきた。

この研究は、農業機械における振動選別機の利用を、振動機構上の点について調べるとともに、選別対象がもみがおもなものである、農業機械選別機の使用状態では、粒子は流動層をなす状態で供給される場合が多いので、もみを対象として振動形と移送速度との関係を明らかにするとともに、振動ふるいにおけるもみと玄米の分離特性の比較検討を行ない、巨視的ではあるが、流動層における粒子の網面からの通過の過程を粒子の拡散と考え、拡散係数を求め網下効率と有効網長との関係を推定しようとしたものである。

## 2. 振動ふるいの振動機構

わが国における農業機械で振動機構を選別機に用いているものには、次の場合がある。(1)わらと穀粒の選別、(2)もみと玄米あるいは玄米と碎米の選別、(3)除石または除糠などである。

### 1) 振動発生機構

農業機械に用いられる振動発生機構には偏心駆動(クランク機構、カム機構)が用いられ、選別操作には振動ふるい分けだけでなく風選が併用されているものが多い。これらの振動発生機構はコンバインなどに見られるように、揺動式のプラットフォーム型から、次第に慣性

力の小さいクランク式になる傾向があり、その取り付けは、もみすり機用選別機では床置形が普通であるが、圃場作業機のコンバインなどでは、選別部は機械の中に組み込まれている。

### 2) 振動数・振幅および遠心効果

第1図は現在利用されている振動ふるいの振動数・振幅および遠心効果の関係を示す。普通形コンバインのストローラックおよびシューシープにおいては、振幅40~60mm<sup>1)</sup>、振動数200~400cpm、遠心効果1.5~3.0の範囲にあり、その中でシューシープの振動条件は、振幅、振動数ともにストローラックなどに較べ比較的小さい値である。一方自脱型コンバインでは、振幅約15mm、振動数約400cpm、遠心効果2.5~3.0の範囲で利用され、普通形コンバインの選別部より大きい振動数で

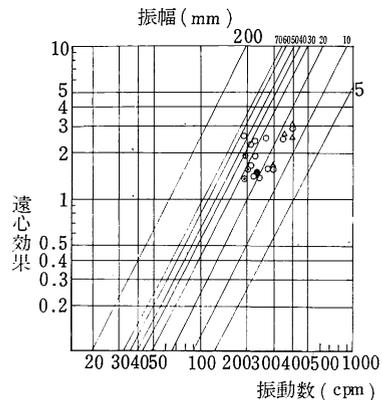


Fig. 1 振動数—振幅—遠心効果の関係

- コンバインのストローラック
- もみと玄米の選別機
- △ 自脱型コンバイン
- ▲ パテクリーナ
- ◎ 石抜選別機
- ⊖ コンバインのシューシープ

\* 農業機械学会 東京(1972年4月)講演

\*\* 農業機械工学講座

あるが、比較的小さい振幅であるので、遠心効果はほぼ同じ値である。

また、もみと玄米の振動選別機では、振動条件は約25mm、振動数 220cpm、遠心効果約1.5である。玄米と石の選別機の場合は、一般に風選が併用されていることにより、もみと玄米の場合とほぼ同じ遠心効果の値である。

農業機械に用いられる振動ふるいの振動は、工業用振動ふるいに較べて、一般に振幅が大きく振動数の低いことが特長であると考えられる。これら大振幅、低振動数の振動条件は、網面の振動1サイクル当りのふるい面上での穀粒の相対運動量を大きくする方法として役立つものである。一方振動数を大きくすれば、ふるいの強度および2次振動について考慮する必要があり、とくに2次振動がふるい分け性能にも影響を及ぼすものと考えられるので、農業機械に用いられる振動ふるいの振動条件が大振幅、低振動数であるのは、これらの影響をさげ、穀粒などの移送速度を大きくすることに重点がおかれた結果であると考えられる。

### 3) 網の傾斜角度

農業機械に用いられる振動ふるい面の傾斜角度は、(1)穀粒の移送方向に上向きあるいは下向きに僅かの傾斜角度を有するもの、(2)水平のもの、(3)移送方向およびそれと直角の両方向に傾斜角度を有するものがある。(1)には自脱形コンバイン選別装置の傾斜角 $8^{\circ}\sim 13^{\circ}$ 、パテクリーナの約 $6^{\circ}$ 、普通形コンバインのシューシーブ $0\sim 7^{\circ}$ などがある<sup>2)</sup>。(2)には精米用の除糠装置がある。(3)にはもみと玄米の揺動選別装置があり、移送方向とその直角方向にそれぞれ傾斜角は約 $5^{\circ}$ と $20^{\circ}$ である。また、これらの傾斜角度は利用条件に応じて調節が可能である。

したがって、振動ふるいの網の傾斜角度は、固定式傾斜ふるい<sup>3)</sup>のように、傾斜角度により穀粒に移送速度を与えるわけでないから、一般に固定式傾斜ふるいに比べて小さく、ほぼ水平に近い。

### 3. 往復・だ円および円運動と流動層粒子(もみ)の移送速度

前報<sup>4)~6)</sup>では、各種の運動形と振動条件のもとにおける単粒子の移送速度について、理論解析を行ない、実験によって確かめたものであった。供給量が少なく、網面上に薄くまばらに存在する状態での粒子の運動は、ほぼ単粒の運動とみなすことができる。しかしながら供給量が多く粒子が層を成して供給されるとき粒子の運動は、粒子の相互干渉、すなわち粒子の相互の衝突、粒子が網面より受ける加速力の穀粒層深さによる違い、およ

び連続供給による供給量の影響などにより、単粒の運動の場合より、負のすべりおよびころがりの少ない状態になる。

以上のことから、流動層の場合は、単粒の場合とは異なった運動状態であることが予想され、一概に、単粒の運動の理論的解析結果でもって、流動層粒子の運動に完全に適応できるとは言い難い。

#### 1) 実験方法

供試実験装置は、四つ棒リンクを振動源とするふるい機で(第12図参照)、ふるいは網全長1470mm、有効長1270mm、有効幅270mm、正方形網目、線径24、もみ径/平均目開き83%である。もみと網目との静止摩擦係数( $\mu_s = 0.962$ )は、網の下にベニヤ板を敷いたときの摩擦係数で、同じ条件の下での回転円板法により求めた値である。この摩擦係数は、網のみの場合と多少異なることが予想されるが、網のみの摩擦係数に近い値が得られるものとする。もみの含水率は12.5%である。移送速度は、網面上を流れる目立った粒子に注目しながら、一定の距離を移送する時間をストップウォッチにより測定し求めたものである。

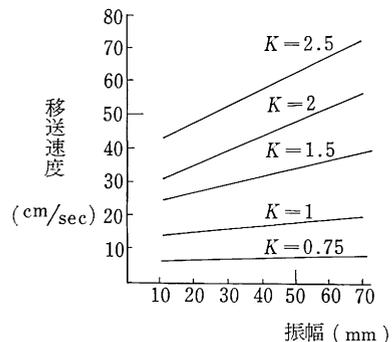


Fig. 2 振幅と移送速度との関係

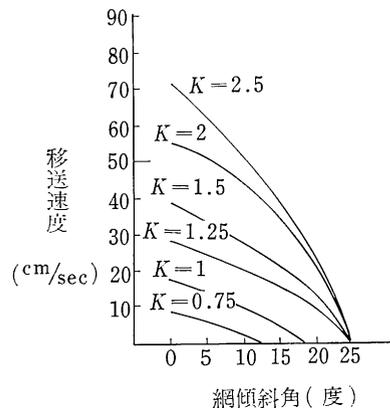


Fig. 3 傾斜角度と移送速度との関係

## 2) 実験結果および考察

### (1) 往復運動の場合

(A) 振幅と移送速度 第2図は、 $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$ 、供給量 934kg/hour での振幅と移送速度との関係の1例である。遠心効果  $K$  の値が増加し振幅が大きくなると振幅による移送速度差が大きくなる。これは1サイクルにおける相対変位が大きくなるためである。遠心効果  $K$  の増加に対する移送速度は、ほぼ比例的に増加する傾向がある。遠心効果の大きい範囲における移送速度は、単粒の場合と近似している<sup>4)</sup>。たとえば、 $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ, K = 2.5$  で移送速度は単粒のとき(計算値<sup>4)</sup>)約 67cm/sec、流動層では 70cm/sec とほぼ近い値を示す。これらのことは理論式の妥当性を立証している。

(B) 網の傾斜角度と移送速度 第3図は、投射角  $\alpha = 45^\circ$ 、振幅 70mm、供給量 934kg/hour のときの、網の傾斜角度と移送速度との関係である。網の傾斜角度は網の先端を上方に高くしたときの網と水平面とのなす角である。

粒子の移送速度は、網の傾斜角度の増加により減少し、傾斜角度が  $25^\circ$  では粒子の移送速度は 0 になる。この結果から、もみを網面上で移送するときの傾斜角度の利用限界角は約  $25^\circ$  であり、この角度は利用上において大きい意義をもつ。

(C) 投射角度と移送速度 粒子の移送速度は単粒の場合<sup>4)</sup>と同じように投射角度により影響されるところが大きいことは明らかである。第4図は、傾斜角  $\beta = 0^\circ$ 、振幅 70mm、供給量 934kg/hour のときの網の投射角度と移送速度との関係である。移送速度は投射角度の増加とともに増大するが、投射角度が  $45^\circ \sim 50^\circ$  を越えると漸次減少することが予想される。

### (2) だ円および円運動の場合

だ円および円運動において、粒子の移送速度に影響を及ぼす因子は、前報<sup>5)</sup>の単粒運動において述べたとお

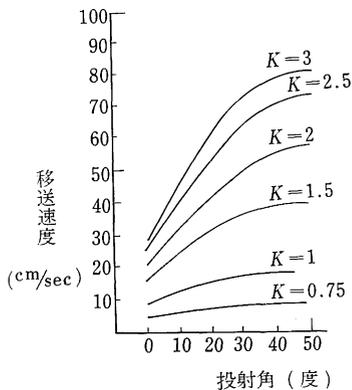


Fig. 4 投射角度と移送速度との関係

り、ふるいの回転方向、振幅の短軸と長軸の比、投射角度および傾斜角度がある。

(A) だ円運動の場合 第5、6図は、投射角  $0 \sim 45^\circ$ 、傾斜角  $\beta = 0^\circ$ 、だ円長軸 ( $a$ ) (70mm)、短軸 ( $b$ )、振幅比  $b/a = 0.5$ 、供給量 934kg/hour で回転方向別の振動数と移送速度との関係を示す。Counter-flow の場合には、粒子の移送速度は振動数の増加により増加する。これに反して Con-flow の場合の移送速度は、投射角度によって振動数の増加により、移送速度が減少し 0 に近づく傾向がある。Con-flow の場合におけるこの傾向は  $b/a$  が大きくなるにしたがいより明らかになる(第8図参照)。

Counter-flow で投射角  $\alpha = 45^\circ$ 、傾斜角  $\beta = 0^\circ$ 、流動層のときの振動数の増加による移送速度の増加の傾向は、負のすべりまたはころがり運動が生じない場合の単粒の場合とほぼ近似している。しかしながら、たとえば、投射角  $\alpha = 45^\circ$ 、傾斜角  $\beta = 0^\circ$ 、振動数 140cpm で  $\mu_s = 0.71$  の単粒の場合の移送速度の計算値は 18.9 cm/sec、流動層の場合は 30cm/sec で、流動層の方が大きい値となる。これは連続供給による影響もその一因である。

一方、Con-flow の場合における流動層粒子の移送速度と単粒子の振動数と移送速度との関係は、すべり運動の推定される範囲ではほぼ同じ傾向である。たとえば、

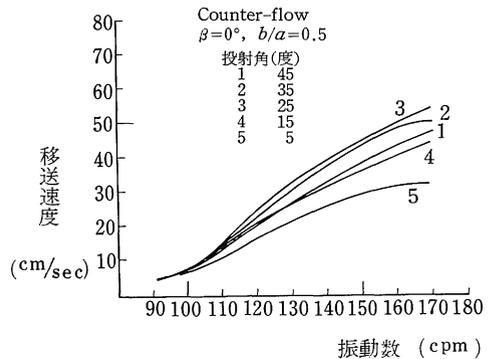


Fig. 5 振動数と移送速度との関係

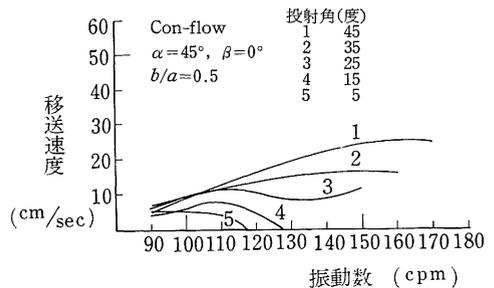


Fig. 6 振動数と移送速度との関係

投射角  $\alpha = 25^\circ$ ，傾斜角  $\beta = 0^\circ$ ，振幅  $b/a = 0.5$ ，振動数 110cpm の  $\mu_s = 0.71$  で，単粒の場合の計算による移送速度は 18cm/sec，流動層では  $\mu_s = 0.945$  で 14cm/sec となり，摩擦係数が多少異なるけれども，単粒の計算値と流動層の実測値はほぼ近似した値であることがわかる。

しかしながら，飛行運動を伴う振動数の範囲において，単粒の場合に見られた飛行運動による移送速度の急激な減少は起こらない。流動層の場合の移送速度は，振動数の増加とともに増加する傾向があり，単粒の場合より大きい値となる。

この理由は，単粒の運動の場合には，移送方向と反対方向のすべり運動が飛行運動に先行したので，移送速度は小さい値となった。しかし連続供給で流動層の場合には，供給量および流動層の影響によって，負のすべりあるいは負のころがり妨げられるために，移送速度が大きくなったものである。

以上の実験結果から，流動層の移送速度の計算に当たって，単粒の移送速度の理論的解析結果を用いて計算を行なう場合には，流動層の粒子の運動状態を明らかにすることが必要である。

(2) 短軸/長軸比と移送速度 第7，8図は，振幅  $a = 70\text{mm}$ ，傾斜角  $\beta = 0^\circ$ ，供給量 934kg/hour，投射角  $\alpha = 45^\circ$  で，回転方向別の振幅比 ( $b/a$ ) と粒子の

移送速度との関係を示す。

回転方向にかかわらず，振幅比  $b/a$  の増加，すなわち円運動から円運動になるにしたがい，粒子の移送速度は，漸次減少する傾向にある。この減少の傾向は，振動数の増加とともに顕著になる。これは単粒の場合と同じ傾向にある。

一方，Con-flow においては，Counter-flow より粒子の移送速度の減少が大きく振幅比が大きくなり，振動数が増加するにしたがって，粒子の移送速度は 0 になる。この傾向は投射角度に関連があり，投射角度が小さくなるほど顕著になる。

以上の結果から，Counter-flow において，大きな移送速度を得るためには，振幅比が小さいことが必要である。

(3) 投射角度と移送速度 第9，10図は，傾斜角  $\beta = 0^\circ$ ，振幅比  $b/a = 0.5$ ，供給量 934kg/hour で，回転方向別の網の投射角度と粒子の移送速度との関係を示す。

Counter-flow において，振動数の低いときは，投射角度によって左右されるところは少ないが，飛行運動が含まれる 140cpm 以上になると，投射角度による影響がわずかに現われる傾向がある。

粒子の移送速度は，振幅比 ( $b/a$ ) により左右されるので，投射角  $25^\circ \sim 45^\circ$  のときの移送速度は比較的高い移送速度を示し，この傾向は単粒の場合と一致する<sup>5)</sup>。こ

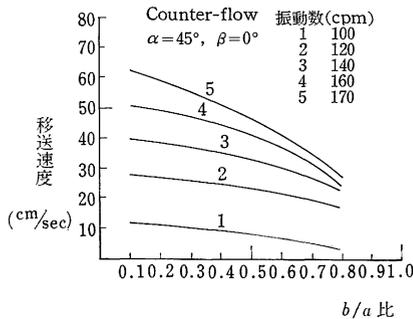


Fig. 7  $b/a$  と移送速度との関係

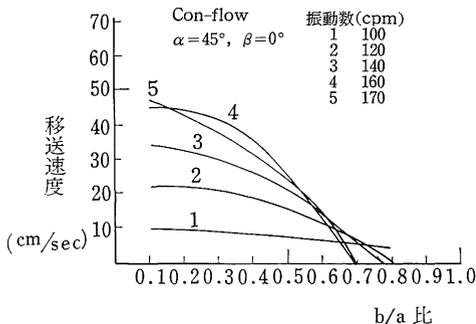


Fig. 8  $b/a$  比と移送速度との関係

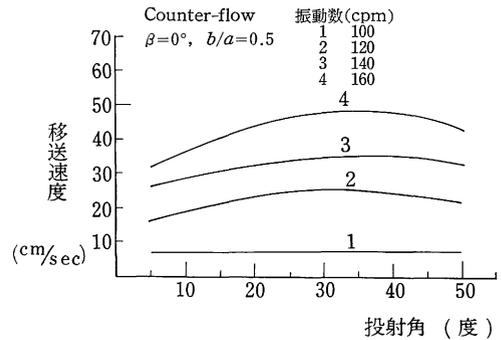


Fig. 9 投射角度と移送速度との関係

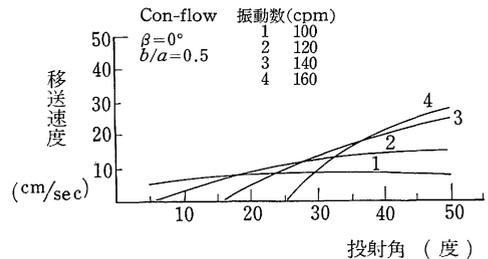


Fig. 10 投射角度と移送速度との関係

の投射角度の範囲内では移送速度の差は認め難く、投射角度が5°~10°と50°以上では、移送速度は他の投射角度に較べ低い値となる。したがって、往復運動の場合に比較して、だ円運動で Counter-flow の場合は、粒子の移送速度は投射角度によって影響を受けることが少ないことが認められる。またこの傾向は、単粒の場合においても確められ、類似の傾向である。

Con-flow の振動数の低い 100cpm のときは、投射角度と移送速度との関係は、Counter-flow とほぼ同じ傾向で移送速度は投射角度の増加にかかわらずほぼ一定である。しかしながら、振動数の増加にしたがい、振幅比に左右されることが大きく、投射角度の減少とともに、粒子の移送速度は減少の傾向が著しくなる。しかも、高い振動数においては大きい投射角度で移送速度は0になる。Con-flow で流動層のときの移送速度は連続供給による負のすべりが減少するために、単粒の理論的解析結果とは一致し難い。

(B) 円運動の場合

第11図は、傾斜角  $\beta = 0^\circ$ 、振幅  $a = 70\text{mm}$ 、供給量 934 kg/hour の場合の遠心効果と移送速度との関係を示す。

Counter-flow における、粒子の移送速度は、遠心効果の増加にしたがい増加の傾向となるが、遠心効果がある範囲を越えて大きくなると次第に減少の傾向となる。この減少の傾向は、単粒の運動の場合に見られなかった点である。この原因は、粒子が網面より受ける水平方向の加速力が他の運動形に比べて小さいことにより、流動層においてはとくにその影響が生じたものである。

Con-flow において、すべり始めの振動数では粒子は移送方向に移送される。しかし振動数が増加するにしたがい、粒子は次第に逆方向の移送速度を持つようになる。

円運動は他の運動形に比べ、機構的に簡単である<sup>7)8)</sup>、駆動の平衡を保つことが容易であるので、農業機械の穀粒の選別の分野においても漸次取り入れられつつある。しかし、以上の結果から円運動ふるい上の流動層粒子の運動は他の運動形に比べ不安定である。

工業用振動ふるいに用いられている円運動の場合、網の傾斜角度が網先きで下向きに5°~10°の傾斜を有して

いる点は、傾斜角度により粒子の移送方向への動きを助長していることとして理解される。したがって農業用の円振動ふるいの設計においても上述の配慮が必要である。

以上の考察から、流動層の粒子の移送速度は、だ円および円運動においては、振幅比と回転方向の選定によっても左右されることが明らかとなった。往復運動に比べだ円運動は駆動によるアンバランスが少ないので、大きい振動数を採用できること、およびふるいの回転方向を変えることにより移送速度が変えられることなどが有利な点である。しかし、機構的には、だ円運動の発生機構は、往復運動に比べ多少複雑であるので、比較的簡単な機構でだ円運動を発生させる装置が必要である。

4. もみと玄米の分離特性

分離対象粒子間の物理的性状に大きい差があるときのふるい分け操作は比較的容易である。しかし、もみと玄米ではその物理的性状がほとんど近似しているので、ふるい分け操作は困難で、これまで、もみと玄米の分離に振動ふるいを適用した研究は全く報告されていない。

したがって、ここに、もみと玄米の分離性能を四つ棒リンクを振動源とする振動ふるいをを用い、往復、だ円および円運動の場合の振動条件、供給量との関係を調べ、巨視的ではあるが、流動層における粒子の網面からの通過の過程を粒子の拡散と考え、コスモ・ホッカプランクの偏微分方程式を用い、拡散係数を求め、網下効率と有効網長との関係を推定した。

1) 実験方法

供試振動ふるいは、四つ棒リンクを振動源(第12図)とするものである。ふるいの振動形は、往復、だ円(短軸/長軸比0.5)および円運動である。網の投射角は、往復、だ円運動では45°とし、網の傾斜角は水平で、振幅は70mm、振動数は90~180cpmの範囲である。ふるい網は有効長1250mm、有効幅270mm、網目開き平均2.635mm、横2.6836mm、線径0.54mm(銅線)、空間率<sup>9)</sup>平均69.8%である。また織りむらによる縦目、横目の目開き偏差は0.167mmであった。

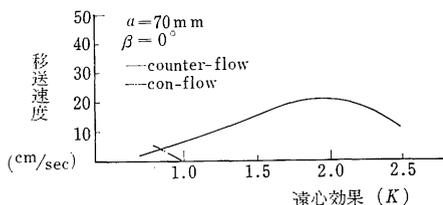


Fig. 11 円運動の場合の遠心効果と移送速度との関係

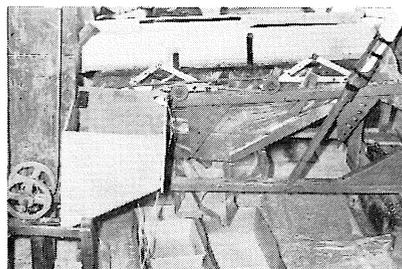


Fig. 12 実験装置

供試材料のもみは 3.36mm, 玄米は 2.83mm の網目を通じたものである。もみ (140個) および玄米 (100個) の平均軸長, 偏差は, もみ:  $\bar{a} = 7.06\text{mm}$ ,  $\sigma_a = 0.2085$ ,  $\bar{b} = 3.132\text{mm}$ ,  $\sigma_b = 0.1388$ ,  $\bar{c} = 2.266\text{mm}$ ,  $\sigma_c = 0.0733$ , 玄米:  $\bar{a} = 5.027\text{mm}$ ,  $\sigma_a = 0.154$ ,  $\bar{b} = 2.868\text{mm}$ ,  $\sigma_b = 0.106$ ,  $\bar{c} = 2.096\text{mm}$ ,  $\sigma_c = 0.074$  であった。もみと玄米の含水率はそれぞれ13.5%, 15%であり, 網ともみおよび玄米との静止, 動摩擦係数ともみ  $\mu_s = 0.831$ ,  $\mu_k = 0.615$ , 玄米  $\mu_s = 0.705$ ,  $\mu_k = 0.550$  である。この摩擦係数は回転円板法を用い, 供試網の下に板を敷いたときの値である。

網上, 下量はふるい上の穀粒の移送速度が定常状態での一定時間の測定値である。供給量は供給漏斗の開度をもって調節し, もみと玄米の混合率は重量比で50:50とした。各口におけるふるい分け後の混合率はみかけ比重との関係から求めたものであり, みかけ比重は秤量された粒子を一定の高さ (30cm) の漏斗を介してメスシリンダ (200cc) に収納し, 穀粒層の表面を均平にして一定加圧 (80g) のもとでの容積を測定し計算した<sup>10)</sup>。この場合, もみと玄米は, ふるい網目により整粒されたものであるから, 穀粒のみかけ比重と混合率はほぼ比例の関係にある。そのみかけ比重と混合率との関係は次の式で示される。

$$Y = 440.784X - 265,173 \quad (1)$$

ここに,  $X$ : みかけ比重,  $Y$ : 混合率 (%)

したがって, 各口の混合率は上式からみかけ比重を測定することにより得られる。

## 2) 実験結果および考察

### 〔1〕 振動形とふるい分け性能

(1) 往復, だ円および円運動における 振動数と玄米の網下率との関係 第13~15図は, 振幅 70mm, 網の傾斜角  $\beta = 0^\circ$  の往復, だ円運動 (短軸/長軸 0.5)

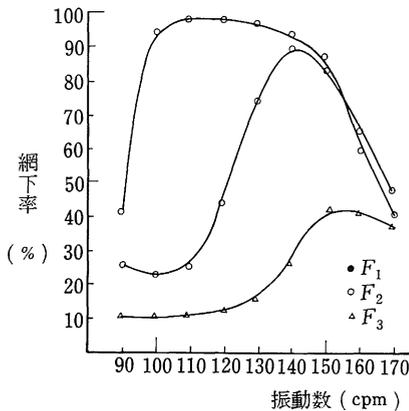


Fig. 13 往復運動における網下率と振動数との関係

で投射角 $45^\circ$ および円運動の Counter-flow で, 供給量 ( $F_1 = 382, F_2 = 1269, F_3 = 2685\text{kg/hour}$ ) の場合の振動数と玄米の網下率との関係である。

網下率は高い振動数においてほぼ一致する傾向にある。供給量が少なく粒子が網面に一粒ずつ分布するときの往復およびだ円運動においては, その網下率は振動数の増加とともに増加し, 最大網下率を示す振動数が現われる。

以上は, このふるい網により長時間ふるい分けたときに必ず網下粒子となる玄米のみの特性である。しかし, 玄米に網下粒子となるもみが混入されたときには, 当然網下への玄米の通過性が異なることが予想される。

### (2) 往復, だ円および円運動におけるもみと玄米の分離性能

(A) 運動形と分離効率について 第16~18図は振幅 70mm, 網の傾斜角  $\beta = 0^\circ$  の往復, だ円運動 (短軸/長軸 0.5) で投射角  $45^\circ$  および円運動の Counter-flow で, 供給量 ( $F_1 = 382, F_2 = 1267, F_3 = 2685\text{kg}$ )

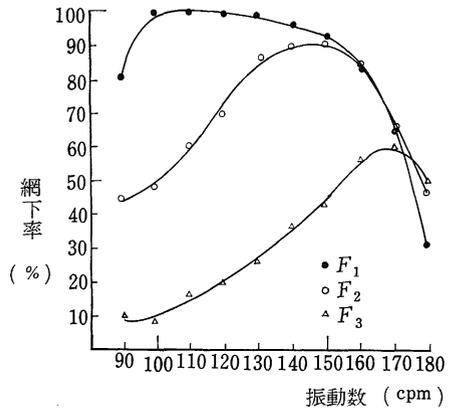


Fig. 14 だ円運動における網下率と振動数との関係

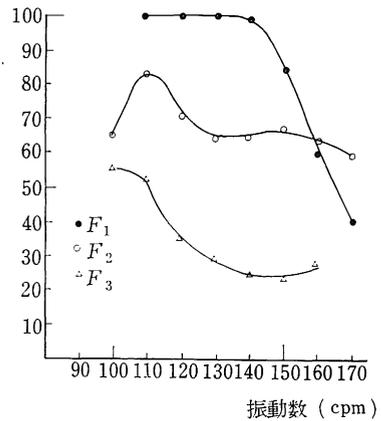


Fig. 15 円運動における網下率と振動数との関係

/hour) の場合の振動数と玄米の網下率との関係である。

分離効率、分離度あるいは分離の有効度として考えられる。一般に分離の鋭さ、すなわち分離効率は有効成分の回収率が大きいほどよいか、あるいは不成分の残留率が小さいほど良いと考えた分離度で示される<sup>11)</sup>。穀粒、粉粒体などの分離効率は化学工学の分野において確立された分離度を適用したもので、その代表的なものに Newton の分離効率がある。Newton 効率の発表後、分離効率について多くの研究報告があるが、これらは Newton 効率により代表される。Newton 効率は次の式により与えられる<sup>12)</sup>。

$$\eta_1 = \frac{(X_q - X_b)(X_a - X_q)}{(X_a - X_b)X_q(1 - X_q)} \quad (2)$$

ここに  $X_q$ : 供給量中の網上粒子の重量率%,  $X_a$ : 網上口中の網上粒子の重量率%,  $X_b$ : 網下口中の網上粒子の重量率%,  $X_q, X_a, X_b$  は(1)式のみかけ比重量と混入率の関係から容易に求めることができる。

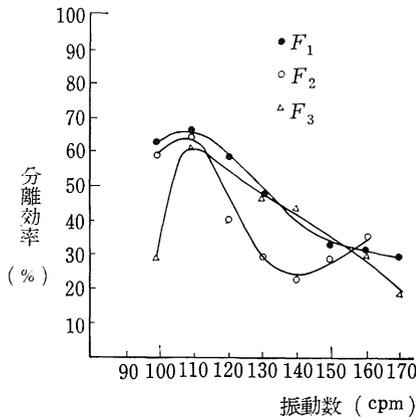


Fig. 16 往復運動における分離効率と振動数との関係

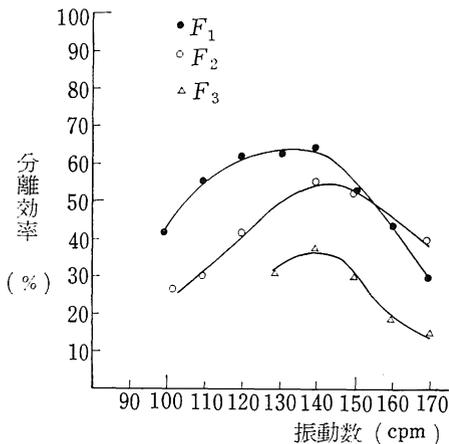


Fig. 17 だ円運動における分離効率と振動数との関係

往復、だ円および円運動の場合の分離効率は、振動数の増加によって増加するが、それぞれ振動数が 110, 140, 100~140cpm で最高値となり、その後振動数の増加により漸次低下の傾向となる。分離効率の最大値を示す振動数は往復運動に比べ、だ円運動の方が大きい、その分離効率は60~70%と同じ値であった。

振動数 100~140cpm における分離効率は供給量の増加により減少する傾向がある。

これらの結果から、分離効率の高い振動数は往復運動 110cpm, だ円運動 140cpm, 円運動 120~130cpm の範囲である。しかし、これらの分離効率は振幅、網の傾斜角度、投射角度、網の目開き、粒子の物理的性状などにより左右される。これらの点についてはここで検討する必要がある。

### (B) 運動形と網下成分含有率との関係

以上は分離効率の点から考察したものである。しかし振動ふるいの利用方法により、分離効率よりも、網下口への高い網下成分の回収を目的とすることにより、ふるい分けの目的が達成される場合が多い。したがって、この場合、網下口に占める網下成分含有率が重要な要素となる。次に玄米の網下成分含有率について検討する。第19~21図は振幅 70mm, 網の傾斜角  $\beta = 0^\circ$  の往復、だ円(短軸/長軸0.5)で投射角  $45^\circ$  および円運動の Counter-flow で、供給量 ( $F_1 = 151, F_2 = 720, F_3 = 1858\text{kg/hour}$ ) の場合の振動数と網下口の網下成分含有率との関係を示す。網下成分含有率は網下口全量に対する網下成分(玄米)の重量割合である。

往復運動のときの網下成分含有率は、振動数が 110 cpm 前後で最大となり、振動数の増加によって減少する。供給量 151kg/hour のときの網下成分含有率は供給量の多いときより低い値を示す。供給量が多くなると網下成分含有率は 70~100% と高い値になる。とくに供

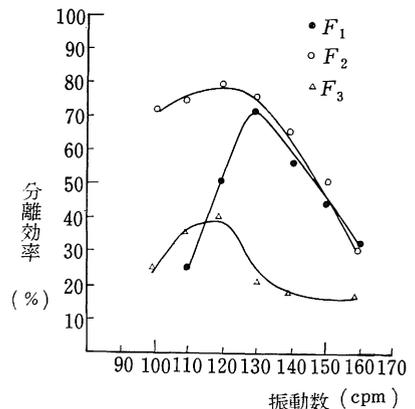


Fig. 18 円運動における分離効率と振動数との関係

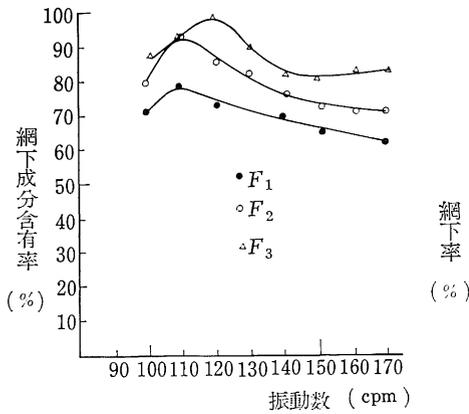


Fig. 19 往復運動における網下成分含有率と振動数との関係

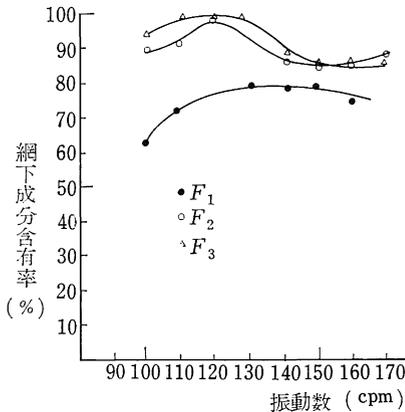


Fig. 20 だ円運動における網下成分含有率と振動数との関係

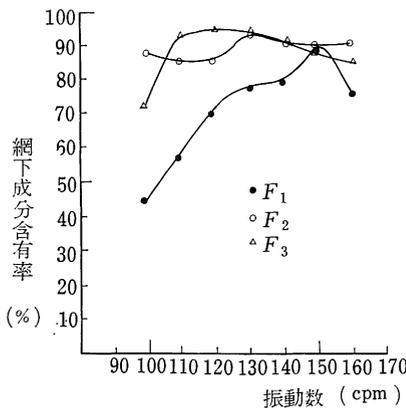


Fig. 21 円運動における網下成分含有率と振動数との関係

給量 1858kg/hour では、網下成分含有率は 100%となる。往復運動においても、網下口における玄米の回収を目的とする場合には、高い含有率の玄米が得られることが明らかとなった。

だ円運動の場合の網下成分含有率は、供給量 151kg/hour では振動数の増加にしたがって網下成分含有率は増加の傾向がある。供給量が多い場合は、振動数が 130 cpm を越えると網下成分含有率は多少低下の傾向となる。網下成分含有率は供給量が 720, 1858kg/hour では振動数が 110~130cpm で100%の値となる。また円運動における網下成分含有率は往復運動の場合より比較的高い値を示す。したがって、網下口における玄米の回収を目的とするとき、だ円運動は往復運動に比べ高い網下成分含有率が得られることが明らかである。

円運動の場合の網下成分含有率は、供給量 151kg/hour のとき振動数の増加とともに増加する。しかし、供給量の多い 720, 1858kg/hour では、網下成分含有率は振動数による影響が少なく比較的高い80~95%値となる。円運動における網下成分含有率が100%となる振動数はこの場合存在しない。これは、粒子の運動特性に原因があると考えられる。すなわち、負のすべり運動が他の運動形に比べ大きいため、玄米以外のもみの網目からの通過を促進させるものと考えられる。これらの関係は、単粒あるいは後述の網下効率曲線を参照することによって明らかになる。また供給量が比較的多いときの供給量による網下成分含有率の差は明らかでない。

以上の点から、往復、だ円および円運動において、高い網下成分含有率を得るためには、だ円運動がもっとも理想的である。振動ふるいの設計に当たって、これらの点は十分に考慮する必要がある。

(C) 運動形と網下効率との関係 網下効率は供給量中の玄米量と網下量中の玄米量との割合でもって表わ

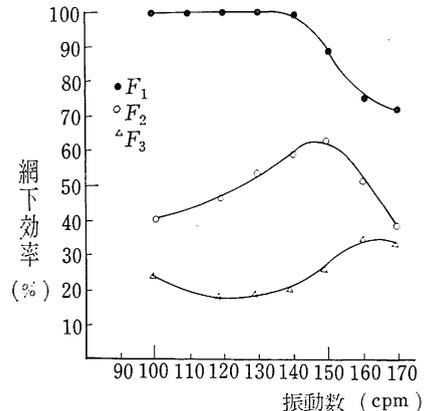


Fig. 22 往復運動における網下効率と振動数との関係

される。すなわち、網下口への網下成分量の供給量中に占める網下量の回収の割合を示すものである。

(i) 網長一定の場合 第22~24図は振幅 70mm、網の傾斜角  $\beta = 0^\circ$  の往復、だ円運動 (短軸/長軸0.5) の投射角  $45^\circ$  および円運動の Counter-flow で供給量  $F_1 = 151, F_2 = 720, F_3 = 1858\text{kg/hour}$  の場合の振動数と網下効率との関係である。

往復運動において、供給量の少ない  $151\text{kg/hour}$  では、振動数が  $100\sim 140\text{cpm}$  で網下効率は100%となり、振動数の増加とともに減少の傾向がある。供給量が少なく振動数が低いときには、玄米の網目からの通過確率が増加し高い網下効率となる。供給量の増加により、網下効率は低下する。また、振動数の増加によって、網下効率は増加し、最大の網下効率を示す振動数が現われ、その後は振動数の増加により減少の傾向となる。この傾向は玄米のみの振動数と網下率との関係に類似しているこ

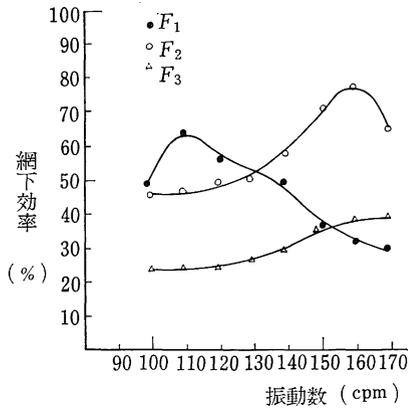


Fig. 23 だ円運動における網下効率と振動数との関係

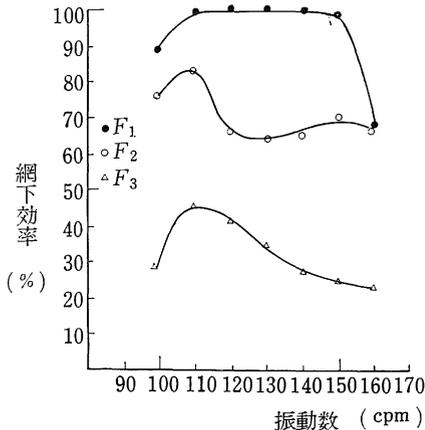


Fig. 24 円運動における網下効率と振動数との関係

とが明らかとなった。

だ円運動においては、供給量の少ない  $151\text{kg/hour}$  のときは、網下効率は、振動数の増加とともに漸次減少の傾向となる。この場合の網下効率は低い値である。一方供給量の多い  $720, 1858\text{kg/hour}$  での網下効率は、往復運動のとときと同様に、振動数の増加とともに変化する。また最大の網下効率を示す振動数が存在する。

円運動においては、網下効率は供給量  $151\text{kg/hour}$  で、振動数  $110\sim 150\text{cpm}$  において100%になる。一方網下効率は供給量の増加とともに低下する。供給量の多いときは、網下効率は振動数の低い範囲で高い値となり、振動数の増加とともに漸次減少の傾向となる。網下効率と振動数との関係は、網下となる玄米のみの網下率の傾向と全く類似の傾向であることが明らかとなった。

(ii) 網長が変わる場合 網長別の網下量は網長 25cm 間隔に仕切りを設け各区間ごとに測定した値であ

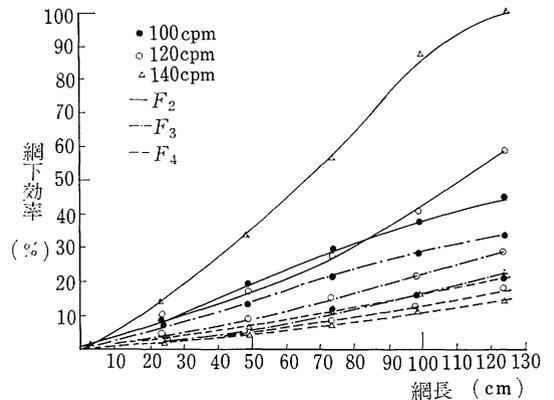


Fig. 25 往復運動における網下効率と網長との関係

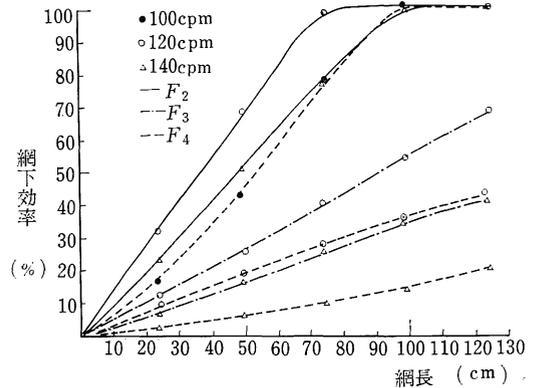


Fig. 26 だ円運動における網下効率と網長との関係

る。測定区間は5区間である。測定はふるい分けが定常状態に近い範囲をうるために測定時間を長くとり30秒とした。しかし、駆動初期のふるい分けの影響が測定に当り多少とも介入することはやむを得ないことであったが、網長別の網下効率を知る上において意義があるものとする。

第25～27図は、振幅70mm、網の傾斜角45°の往復、だ円運動(短軸/長軸0.5)の投射角および円運動のCounter-flowで供給量( $F_2 = 720, F_3 = 1858, F_4 = 2462\text{kg/hour}$ )の振動数100, 120および140cpmの場合の網長と網下効率との関係を示す。

往復運動において、網下効率は網長の増加とともに増大し、供給量の増加とともに減少する傾向がある。

だ円運動において、網下効率は網長の増加とともに増加する。その関係はほぼ比例的関係にある。供給量720kg/hourのときの網下効率は、網長100cmで100%になる。すなわち、供給量、振動条件により網長別の網下効率は異なる。

円運動においても、網下効率は網長の増加とともに増大し、往復、だ円運動の場合と同じく、比例的関係にあった。

以上から、網下効率は網長の増大とともに漸次増加する傾向がある。また、供給量、運動形、振動条件により網長別の網下効率は異なる値となることが明らかとなった。

## 2. 有効網長と網下効率の関係

供給された混合米において、玄米が流動層を通り網目

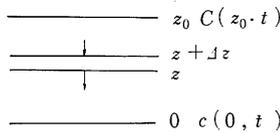


Fig. 28 濃度の拡散モデル

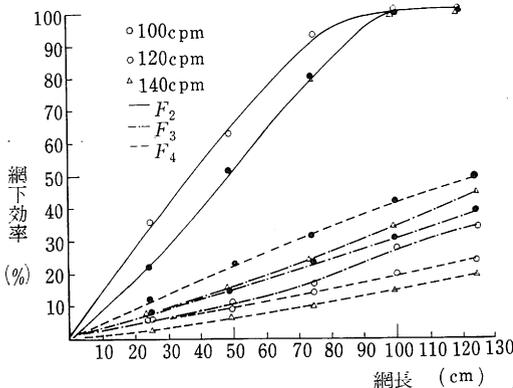


Fig. 27 円運動における網下効率と網長との関係

より通過する過程を熱の伝達、すなわち、拡散と同じ数学的モデルとし<sup>13)</sup>、拡散する玄米は混合率に比例すると考える。すなわち、線形であると考え、半無限の拡散を表す式は次のようになる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{2} D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

ここに、 $D$  は拡散係数  $\text{cm}^2/\text{sec}$ 、 $C$  は濃度である。

(3)式は拡散過程を支配する偏微分方程式で、一般によく知られ、コスモ・フォック・プランクの偏微分方程式である<sup>14)~17)</sup>。いま、境界条件を第28図により  $z = 0, z = z_0$  と与えることにより、(3)式の解は次のように与えられる<sup>18)~21)</sup>。

$$C = \frac{1}{\sqrt{2\pi Dt}} \left\{ \exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{2Dt}\right) - \exp\left(-\frac{(z+z_0)^2}{2Dt}\right) \right\} \quad (4)$$

$z = 0$  まで差しふるい分けられる確率的平均速度を  $v$  とすると、時間  $t$  までにふるい分けられる確率は<sup>22)</sup>、

$$W = \int_0^t v \cdot dt$$

$$v = \frac{D}{2} \left( \frac{\partial c}{\partial z} \right)_{z=0}$$

$$\left( \frac{\partial c}{\partial z} \right)_{z=0} = \frac{2z_0}{Dt\sqrt{2\pi Dt}} \exp\left(-\frac{z_0^2}{2Dt}\right)$$

そこで、積分変数  $x = z_0/\sqrt{2Dt}$  を導入すると

$$W = 1 - \text{erf}\left(\frac{z_0}{\sqrt{2Dt}}\right) \quad (5)$$

$$\text{ただし、} \text{erf}\left(\frac{z_0}{\sqrt{2Dt}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{z_0}{\sqrt{2Dt}}} \exp(-x^2) dx$$

(5)式を連続ふるいに適用するためには、ふるい分け時間は網長  $L$  と粒子の平均移送速度  $V$  との関係で表わせるので、

$$t = \frac{L}{V}$$

網下効率  $\epsilon$  は、上記の確率に等しいものとし、供給時の層高さを  $z_0 = h$  とすると

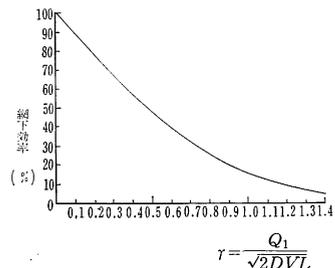


Fig. 29 網下効率と  $r$  との関係

$$\varepsilon = W = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{h}{\sqrt{2DL/V}}\right)$$

単位ふるい幅当りの体積処理能力を  $Q_1$  とすると  
 $Q_1 = h \cdot V$

$$\text{よって, } \varepsilon = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{Q_1}{\sqrt{2DLV}}\right) \quad (6)$$

(5)式および(6)式の第2項の關係は誤差関数表から得られ、これらは第29図のように表わすことができる。

この關係は近似的に次の關係で表わされる。

$$\varepsilon \doteq 100 - 102 \cdot \gamma \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{Q_1}{\sqrt{2DLV}} = \frac{h}{\sqrt{2Dt}}$$

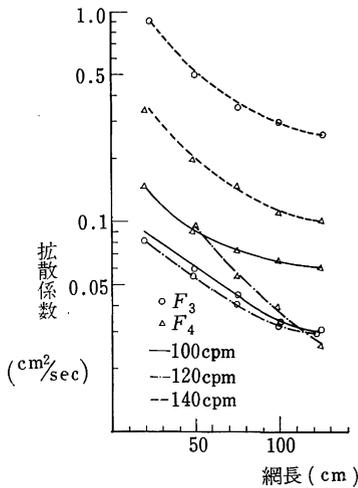


Fig. 30 往復運動における網長と拡散係数との關係

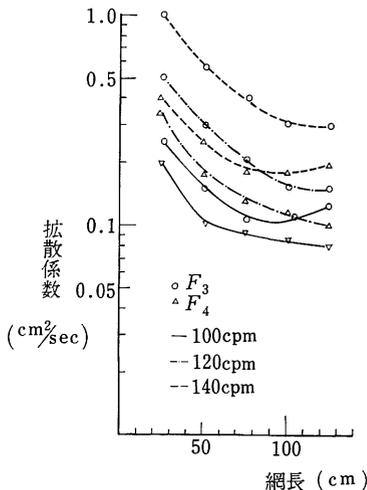


Fig. 31 だ円運動における網長と拡散係数との關係

したがって、連続ふるいの場合の拡散係数および有効網長は(7)式より

$$\text{拡散係数 } D = \frac{(102 \cdot Q_1)^2}{2LV(100 - \varepsilon)^2} \quad (8)$$

$$\text{有効網長 } L = \frac{(102 \cdot Q_1)^2}{2DV(100 - \varepsilon)^2} \quad (9)$$

で表わされる。単位ふるい幅当りの体積処理能力  $Q_1$  は、単位時間に網下、網上になる総量を網の有効幅で除し、平均の混合率を50%とし、そのみかけ比重(0.715)で除した値でもって表わした。穀粒の平均移送速度は、網面での目立った粒子に注目しながら、一定時間を移送するに要する時間をストップウォッチにより測定し求め

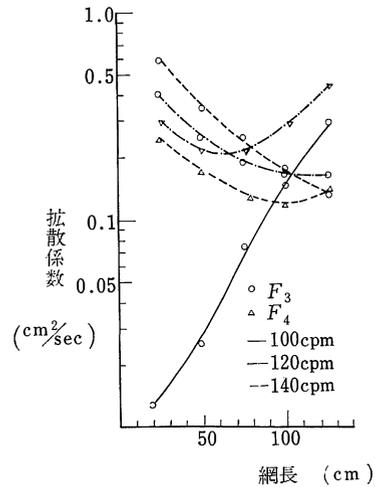


Fig. 32 円運動における網長と拡散係数との關係

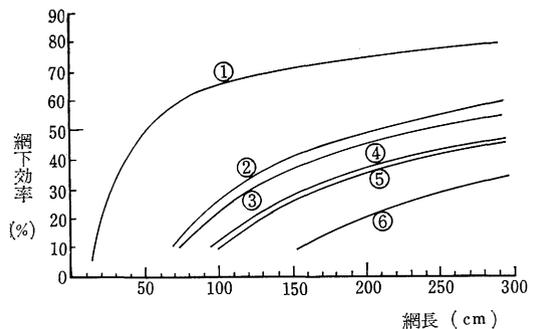


Fig. 33 網長と網下効率との關係

運動形	振動数	供給量
① 円	120	$F_3$
② だ円	120	$F_3$
③ 往復	120	$F_3$
④ 〃	140	$F_3$
⑤ だ円	140	$F_4$
⑥ 円	140	$F_4$

た値である。

第30～32図は振幅 70mm, 網の傾斜角  $\beta = 0^\circ$  の往復, だ円運動(短軸/長軸0.5)の投射角  $45^\circ$  および円運動の Counter-flow で振動数 100, 120 および 140cpm で供給量 ( $F_2 = 720, F_3 = 1858, F_4 = 2462\text{kg/hour}$ ) のもみと玄米の網長と拡散係数との関係である。

拡散係数は, 網長の増加とともに漸次減少の傾向があり, 網長 100～125cm になると拡散係数はほぼ一定の値になる傾向がある。拡散係数は回分式の場合に比べ  $1.0\text{cm}^2/\text{sec}$  以下で小さい値である。これは玄米の網目からの通過の難易性と玄米ともみのふるい分けの困難性を示すものである。

第33図は, 上述の結果に基づいて, 振幅 70mm, 網の傾斜角  $\beta = 0^\circ$  の往復, だ円運動(短軸/長軸0.5)の投射角  $45^\circ$  および円運動の Counter-flow のときの振動数 120, 140cpm で供給量 ( $F_3 = 1858, F_4 = 2462\text{kg/hour}$ ) の場合の網長と網下効率との関係を推定した一例である。高い網下効率をうるためには, 長い網長が必要であることが推定される。振動ふるいの設計に当っては一枚の網で高い効率を期待するよりも数枚の網で高い網下効率を達成する方が合理的であろう。また, 拡散係数に關係する因子として, 網目開きが大きな因子であると考えられるので, 拡散係数と網目開きとの関係を明らかにすることは今後の課題である。

以上における一連の研究は, 往復, だ円および円運動の分離性能の比較検討に重点を置いたものであるが, 粒子の形状とか網目開きなどのふるい分けに与える影響については, 今後において検討の必要性が認められるところである。

## 5 摘 要

この研究は, もみの移送速度ともみと玄米の分離特性を往復, だ円および円運動の場合について検討したものである。振動源には四つ棒機構を用いた。

その結果は次のとおりである。

1. 農業機械に用いられている振動ふるいの振幅と振動数は大振幅で低振動数であった(第1図参照)。
2. 往復運動において, もみの移送速度は振動数, 投射角および振幅によって変化する。だ円運動においては振動数, 投射角, 振幅比および回転方向によって変化する。円運動においては, 振動数, 振幅および回転方向によって変化する。
3. 玄米の場合, 最適振動数は供給量と運動形によって変化する。最適振動数を示す網下率は供給量の増加とともに減少する。
4. 分離効率の最大値は60～70%であった。それを生

ずる振動数は運動形によって異なった値になる。分離効率は供給量の増加とともに低下する。

5. 網下効率は玄米の網下率に類似する。また, 網下効率は網長の増加とともに増加する。

6. 拡散係数は網長の増加とともに減少し, もみと玄米の場合その値は  $1.0\text{cm}^2/\text{sec}$  以下であった。

## 参 考 文 献

1. 江崎春雄：バインダとコンバイン 農業図書 東京 1970, 371-372
2. 江崎春雄：農機研報 29, 1968
3. 狩野秀男：脱穀と糶摺 農業機械化協会 東京 1956, 118-122
4. 岩尾俊男・川村 登：農機誌 33：(1) 45-52, 1971
5. 岩尾俊男・川村 登・田辺 一：農機誌 33：(2) 163-172, 1971
6. 岩尾俊男・川村 登・田辺 一：農機誌 33：(3) 274-278, 1971
7. TAGGART, F.: Handbook of Mineral Dressing John Willy and Sons 1967, 7, 47-49
8. 杉本信夫：日機誌 63：(499) 1162-1165, 1960
9. 三輪茂雄：粉体のフルイ分け 日刊工業新聞 東京 1965, 7
10. 久保輝一郎・水渡英二・中川有三・早川宗八郎：粉体, 理論と応用 丸善書店 東京 1968, 882-883
11. 亀井三郎編：化学機械の理論と計算 産業図書 東京 1967, 405-406
12. NEWTON, H. W.: Rock Products 13: 26-30, 1932
13. 一色尚次：伝熱工学 森北出版 東京 1967, 39-50
14. CRANK, J.: The Mathematics of Diffusion Clarendon 1955, 9-52
15. DALLAVALLE, J. M.: Micromeritics Pitman 1948, 168-175
16. 寺沢寛一編：数学概論, 応用編 岩波書店 東京 1966, 490-520
17. 磯田和男・大野豊監修：Fortran による数値計算ハンドブック オーム社 東京 1971, 342-348
18. 近藤次郎：応用数学 丸善書店 東京 1965, 90-93
19. 福田安蔵・鈴木七緒・安岡善則・黒崎千代子：応用解析演習 共立出版 東京 1971, 201-204
20. 小平吉男：物理数学第二巻 文献社 東京 1971,

- 302-317  
21. クライツィグ, E. 著・田島一郎・近藤次郎訳: 偏微分方程式と複素関数論 培風館 東京 1971.
- 228-229  
22. Неломнящий: Обогащение Руд (5) 27-33, 1960

### Summary

This paper is experimental results on flowing velocity of paddy and screening character of paddy and rice by the screen, oscillating in the reciprocating, elliptical and circular motion. The four-bar linkage was adopted in order to oscillate the screen in that motion respectively.

The main results were as follows :

- 1) Oscillating screens used to the agricultural machinery have, in general, large amplitude and small frequency as in Fig (1).
- 2) The flowing velocities of paddy varied by the frequency, amplitude and angle of projection in the reciprocating motion, by the frequency, angle of projection, rate of amplitude (minor to major axis) and direction of rotation in the elliptical motion, and by the frequency, amplitude and direction of rotation in the circular motion, respectively.
- 3) On the screening of rice from the paddy, there were the optimum frequencies according to the feeding rate of each oscillating types of screen, and the screening rates of them decreased with the increase of feeding rate.
- 4) The maximum values of screening efficiency were 60~70%, though frequencies of that value were varied according to the oscillating types of screen. Also the screening efficiencies decreased with the increase of the feeding rate.
- 5) The undersize recoveries were similar to the characteristics of screening rate of rice, and yet they increased with the increase of the length of screen. The coefficients of diffusion were decreased with the increase of the length of screen.