

# 振動ふるい上の粒子の運動の位相範囲と網下率との関係についての一考察

岩尾俊男<sup>※</sup>・田辺一<sup>※</sup>

Toshio Iwao and Hajime Tanabe

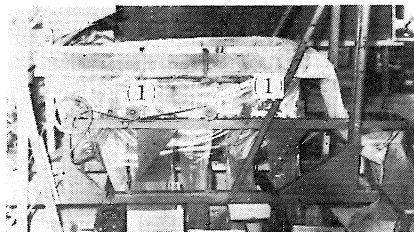
Studies on the Ranged Phase of Motion of Grains and the Rate of Screening under the Reciprocating, Elliptical and Circular Motion

## I 緒 論

振動ふるいによるふるい分け精度については、種々の要因（振動条件、粒子の物理性、ふるい網の性状などが相互に関連して影響をおよぼすことが、Fowler<sup>1)</sup>や筆者<sup>2)</sup>らの研究報告により明らかにされている。しかしながら、これまで、粒子の運動の位相範囲と網下率との関係についての研究は、ほとんど見当たらない。

すべり運動および飛行運動の粒子の運動が、網下率を増大させるものであることは、筆者らの研究により推定される場所であるが、しかしながら、これまでの研究では、振動ふるいの各種運動形について、粒子の運動と漏下特性との関連を適確に解明するまでには至っていない。

筆者らが今まで、往復<sup>3)</sup>、だ円<sup>4)</sup>および円運動<sup>5)</sup>ふるい上の単粒子の運動についての一連の理論的解析を行なった結果、単粒ではあるが、粒子の運動状態が明らかになったので、本研究は、これらの結果に基づいて、往復、だ円および円運動の場合のふるいの1サイクルにおける、粒子の運動の位相範囲と網下率との関係について、検討を行なったものである。



第1図 実験装置  
1. 振動源（四棒リンク）

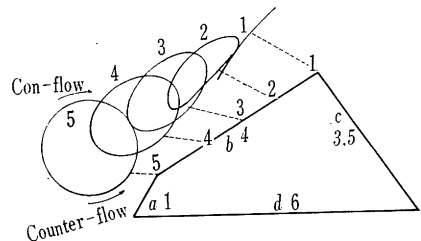
運動の位相範囲とは、粒子が定常運動を行なうものとして、網の1サイクルについて、網面上での粒子のすべりおよび飛行運動の運動始めと終りの位相差である。網下率とは、単位時間に漏下した網下量と網上量の合計値の前者に対する比率である。

## II 実験方法

第1図は、四棒リンク（リンク比  $a : b : c : d = 1 : 4 : 3.5 : 6$ 、振幅 70mm）4個を振動源とする供試実験機の振動ふるいである。振動形は第2図に示すごとく、ふるいを固定する接続棒の位置によって、往復、だ円（短軸/長軸比 $\frac{1}{8}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$ ）および円運動となる。

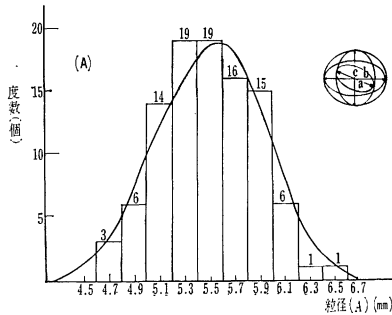
供試ふるいは、機構上から、網の有効長 1250mm、有効幅 270mm で、網の性状は、網目開き（平均）6.90mmの正方形網目、空隙率78.5%である。往復運動およびだ円運動についての投射角は  $\alpha = 45^\circ$  とした。投射角とはふるいの振動方向のなす角度である。一般に振動ふるいの網面がほぼ水平に近いものが多いので、傾斜角度は  $\beta = 0^\circ$  とした。

振動数は、振幅が大きいため、比較的低い振動数の90~170rpm とした。供試材料は、粒子の長軸長、短軸長による網目からの粒子の漏下性の差をできるだけ少なく

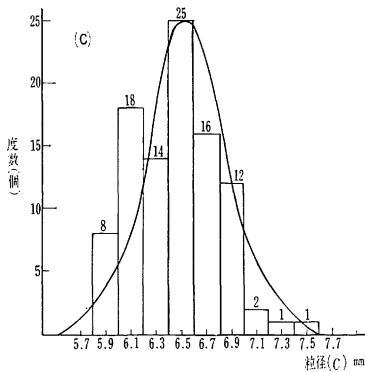
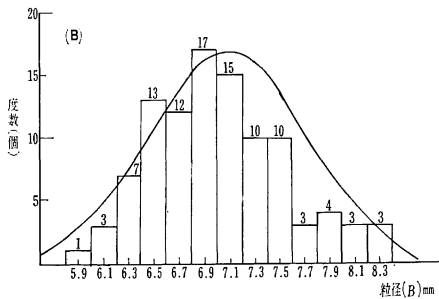


第2図 振動ふるいの振動形

※ 農業機械工学研究室



第3図 (A)(B)(C) 100個の大豆の粒径の分布



するためとふるいの運動形と漏下特性を比較検討するため、とくに、球形に近いもので、しかも、連続繰り返し実験により、穀粒の性状に変化の少ないものとして、大豆（アメリカ大豆）を用いた。

ふるい分けにおいては、網下粒子がおもに網下率に影響するものと考え、一定の網下粒径を得るために、Ro-Tap shakerにより約10秒間ふるい分け、5.66mm<粒径<6.73mmの範囲の粒径に整粒した。

第3図(A)(B)(C)は上述の粒径のサンプル100個の三軸長a, b, cをマイクロメータにて測定した値のヒストグラムで、その平均軸長および偏差(σ)は、a:  $\bar{x}_1 = 5.592\text{mm}$ ,  $\sigma = 0.3730$ , b:  $\bar{x}_2 = 7.126\text{mm}$ ,  $\sigma = 0.570$ , c:  $\bar{x}_3 = 6.538\text{mm}$ ,  $\sigma = 0.3556$ である。これを

正規曲線に適用したのが、同図の曲線で、その分布は次の式により与えられる。

$$a: f(x_1) = \frac{1}{0.3730\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_1 - 5.592}{0.3730}\right)^2}$$

$$b: f(x_2) = \frac{1}{0.590\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_2 - 7.126}{0.590}\right)^2}$$

$$c: f(x_3) = \frac{1}{0.3556\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_3 - 6.538}{0.3556}\right)^2}$$

大豆の含水率は、約16%、網と大豆との静止摩擦係数は  $\mu_s = 0.540$ である。この摩擦係数は板張りの網(6.73mm)を摩擦面として、回転円板<sup>6)</sup>を用いて測定した値である。

供給量は供給漏斗の開度により1765~7250kg/hourの範囲に調節した。

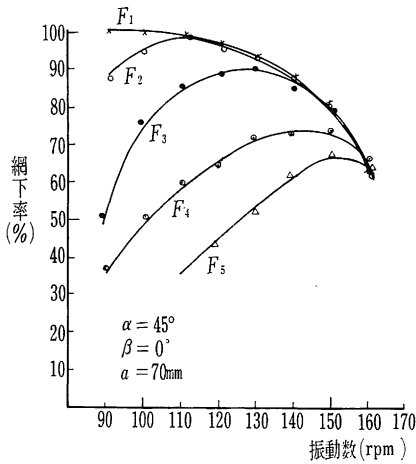
### III 実験結果および考察

この研究は、各種運動形(往復、だ円および円運動)と振動数による網下率との関係を実験により調べるとともに、振動ふるいの各種運動形における粒子の運動の位相範囲を、単粒の運動の理論的解析結果を用いて求め、その運動の位相範囲と実験により得た網下率の関係を考察した。しかし、単粒と層流の場合では、移送速度が同じでも、全く同じ運動現象を呈するとは言い難いけれども、これらの理論的解析結果を用いることは、粒子の網面上での運動の位相範囲の大体の予測が可能であり、漏下特性を比較検討し、それぞれの傾向を知る上で意義がある。

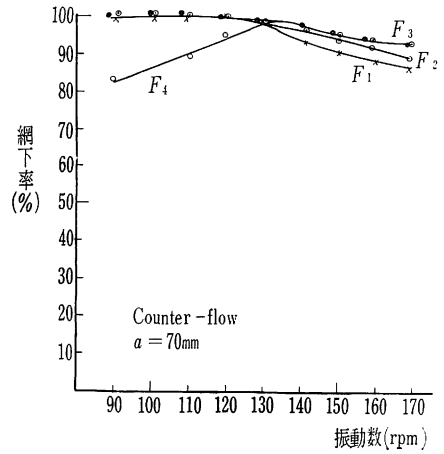
運動の位相範囲と網下率の関係については、振動数による網下率の特性の関係をもとに、すべり運動のみの場合と、すべりに飛行を含む運動の場合の粒子の運動と網下率を比較検討することに重点をおいたが、飛行運動中の粒子は網面との接触がないから、飛行を含む運動の場合は、飛行前後のすべり運動に着目して、すべり運動と網下率との関係を比較検討した。

#### 1. 振動数と粒子の網下率との関係

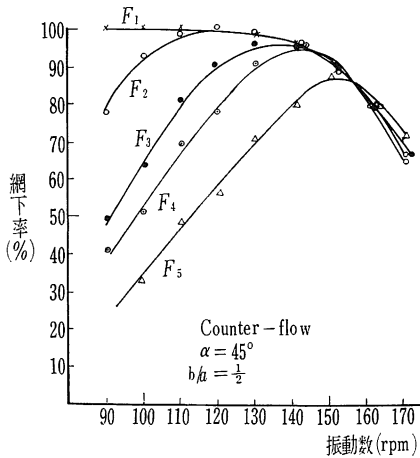
第4~7図は、往復運動(振幅70mm, 投射角  $\alpha = 45^\circ$ , 網の傾斜角  $\beta = 0^\circ$ )、だ円運動(長軸(a)=70mm, 短軸(b)=35mm,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ )のCounter-flow, Con-flow および円運動(a=70mm,  $\beta = 0^\circ$ )のCo-counter-flowの有効網長1250mmで、供給量( $F_1 = 1765$ ,  $F_2 = 3220$ ,  $F_3 = 4570$ ,  $F_4 = 5880$ ,  $F_5 = 7250\text{kg/hour}$ )の場合の振動数と網下率との関係である。供給



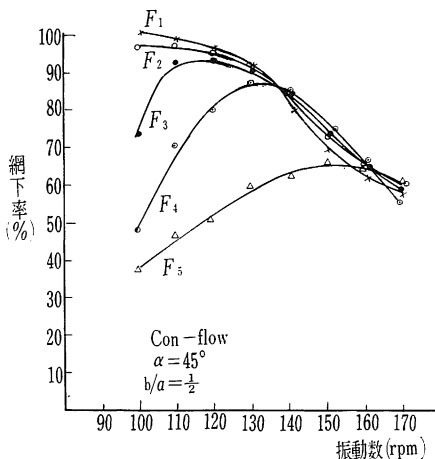
第4図 往復運動の場合の振動数と網下率との関係



第7図 円運動の場合の振動数と網下率との関係



第5図 だ円運動 (Counter-flow) の場合の振動数と網下率との関係



第6図 だ円運動 (Con-flow) の場合の振動数と網下率との関係

量別の網下率曲線は高い振動数の範囲では、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様に分布したと考えられる状態、すなわち、1765kg/hourのときの往復、だ円および円運動の低い振動数ではほとんどの粒子は網面より漏下し、完全漏下の状態となる。しかし、その網下率は振動数の増加とともに、漸次減少の傾向がある。この傾向は、ふるいの運動形および回転方向 (Counter-flow, Con-flow) の別により異なる傾向がある。これに反して、供給量の比較的大きい場合には、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存在する。

これは、往復運動<sup>2)</sup>ふるいによるもみの実験結果とも類似の傾向である。最大網下率を示す振動数は、供給量の増加とともに、高い振動数になる傾向があり、これは、粒子の網目からの最大通過速度を示す振動数に相当する。

以上の結果を粒子の運動から考えると、供給量が少ない1765kg/hour~3220kg/hourで最大通過率を示すときの粒子の運動は、すべりのみの運動の範囲でもある。すなわち、供給量が少ない場合には、大豆が層流とならず、網面に一様に分布すると考えられるので、すべり運動のみで十分に粒子の網目よりの通過が促進されるが、供給量が層流となる場合の最大網下率を示すときの粒子の運動は、この振動数から推定して、飛行を含む運動の範囲と考えられ、この飛行運動が粒子の網目よりの通過を助けていることが予想される。これらの関係のより詳細な検討は第3節において述べる。

以上の結果から明らかなように、最大網下率を示す振動数は、ふるいは運動形、振動条件、供給量などにより変動するから、ほ場収穫機械などのように、供給量の変

動が予想されるものでは、常に同一のふるい分け精度を得るには、一定の供給量に制御するか、あるいは、その変動に応じて振動数を変化させる必要がある。

2. 往復、だ円および円運動とすべり、飛行運動の境界値<sup>4)</sup>

すべりおよび飛行運動の範囲は、粒子の運動の開始と終りの位相が決まれば求められる。本研究ではおもに、層流の場合を対象にしているので、連続供給量の影響により、負のすべり運動およびころがり運動がほとんど起り得ないものと仮定した。

運動の境界値は、筆者らが解析した以下の式により計算を行なった。

1) すべり始めの位相 移送方向へのすべり始めの位相は、

$$\frac{a\omega^2}{g} \cos\theta (1 - \mu \tan(\alpha - \beta)) \pm \frac{b\omega^2}{g} \sin\theta$$

$$(\mu - \tan(\alpha - \beta)) = \frac{1}{\cos(\alpha - \beta)} (\mu \cos\beta + \sin\beta) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\alpha$ ：網の振動方向と水平面とのなす角度、 $\beta$ ：網の傾斜角、 $a$ ：だ円の長軸径、 $b$ ：だ円の短軸径、 $\mu$ ：摩擦係数である。上式はだ円運動のときの粒子のすべり始めの位相を求める式である。式中±の+の符号は Counter-flow、-の符号は Con-flow を示す。往復運動の場合は、 $a = 0, b = a, \alpha + \beta = (\alpha + \beta + \frac{\pi}{2})$  とし、-符号の Con-flow について求められる。

2) すべり終りの位相 移送方向へのすべり終りの位相は、

$$\frac{a\omega^2}{g} (1 + \mu \tan(\alpha - \beta)) \sin\theta \pm \frac{b\omega^2}{g} (\tan(\alpha - \beta) - \mu) \cos\theta - \frac{(\mu \cos\beta + \sin\beta)}{\cos(\alpha + \beta)} \theta = - \frac{(\mu \cos\beta + \sin\beta)}{\cos(\alpha - \beta)}$$

$$\theta_0 + \frac{a\omega^2}{g} (\mu \tan(\alpha - \beta) + 1) \sin\theta_0 \pm \frac{b\omega^2}{g} (\tan(\alpha - \beta) - \mu) \cos\theta_0 \dots\dots\dots (2)$$

3) 飛行始めの位相 飛行始めの位相は、

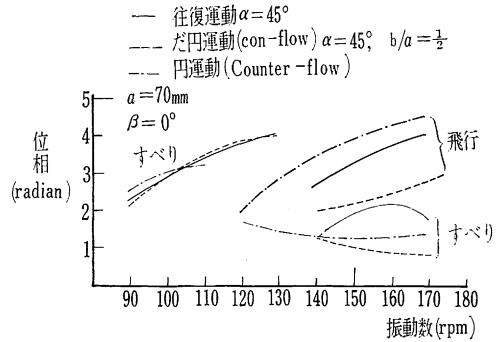
$$\frac{a\omega^2}{g} \tan(\alpha - \beta) \cos\theta \pm \frac{b\omega^2}{g} \sin\theta = \frac{\cos\beta}{\cos(\alpha - \beta)}$$

$$\dots\dots\dots (3)$$

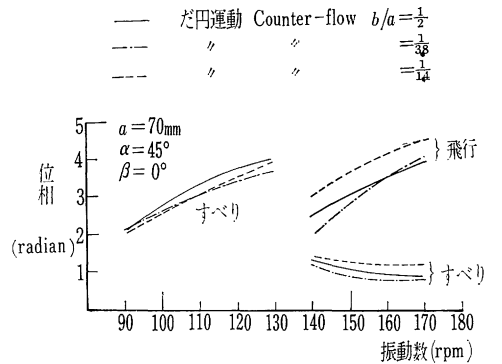
4) 飛行終りの位相 飛行終りの位相は、

$$\frac{a\omega^2}{g} \tan(\alpha - \beta) \cos\theta \pm \frac{b\omega^2}{g} \sin\theta + \frac{\cos\beta}{2\cos(\alpha - \beta)} \theta^2$$

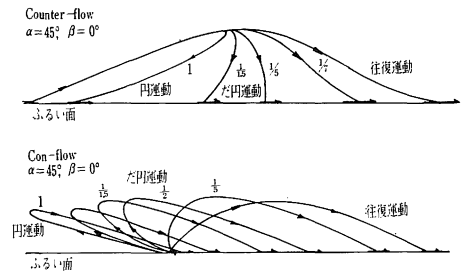
$$+ \left\{ \frac{a\omega^2}{g} \tan(\alpha - \beta) \sin\theta_0 \mp \frac{b\omega^2}{g} \cos\theta_0 - \right.$$



第8図 往復、だ円 (con-flow) および円運動の場合の振動数と粒子の運動の位相範囲との関係



第9図 だ円運動 (Counter-flow) の場合の振動数と粒子の運動の位相範囲との関係



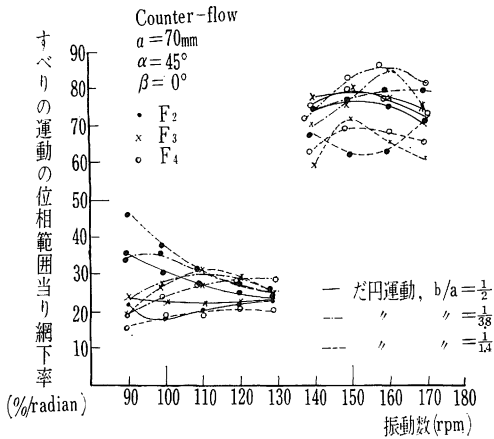
第10図 単粒子が飛行運動を行なうときのふるいの運動形による粒子の網面に対する相対運動の軌跡

注：矢印は粒子の進行方向を示す

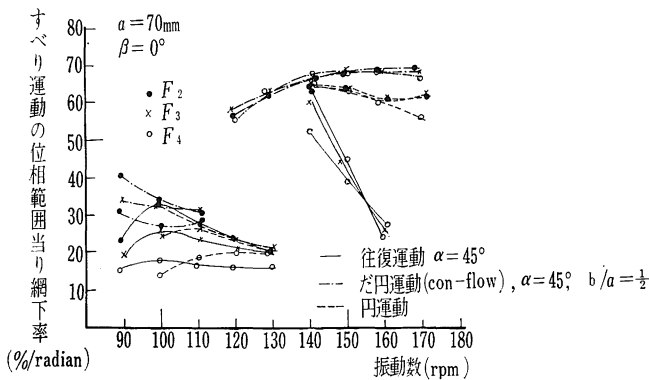
$$\frac{\cos\beta}{\cos(\alpha - \beta)} \theta_0 \left. \theta = - \frac{\cos\beta}{2\cos(\alpha - \beta)} \theta_0^2 + \left\{ \frac{a\omega^2}{g} \right. \right.$$

$$\tan(\alpha - \beta) \sin\theta_0 \mp \frac{b\omega^2}{g} \cos\theta_0 \left. \right\} \theta_0 +$$

$$\frac{a\omega^2}{g} \tan(\alpha - \beta) + \frac{b\omega^2}{g} \sin\theta_0 \dots\dots\dots (4)$$



第11図 だ円運動 (Counter-flow) の場合の振動数とすべり運動の位相範囲当り網下率との関係



第12図 だ円運動 (con-flow) の場合の振動数とすべり運動の位相範囲当り網下率との関係

第8, 9図は  $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ, a = 70\text{mm}$  の往復運動およびだ円運動 ( $b/a = 1/2, 1/3, 1/4$ ) の Counter-flow, Con-flow と  $\beta = 0^\circ, a = 70\text{mm}$  の円運動の Counter-flow の摩擦係数を  $\mu_s = 0.54$  として、振動数と粒子の運動の位相範囲をラジアンで示したものである。

すべりのみの運動の場合においては、ふるいの運動形にかかわらず、すべりの運動の位相範囲は、振動数にほぼ比例して増大する。

飛行運動を含むようになると、すべりの運動の位相範囲は、飛行運動前、後のすべりのみとなり、飛行の運動の位相範囲は振動数の増大とともに大きくなり、それとは反対に、すべり運動の位相範囲は小さくなる傾向にある。この傾向は、ふるいの運動形にかかわらず、ほぼ同じ傾向にあるが、だ円運動から円運動に近づくと低い振

動数での飛行現象が現われる。

以上は、負のすべりおよびころがり運動がなく、しかも粒子が定常運動を行なうものとしたもので、往復、だ円および円運動の粒子の飛行および飛行後のすべりは、単粒のストロボスコープによる写真<sup>3) 4) 5) 7) 8)</sup>から、第10図に示すような状態になることが推定される。すなわち、この研究の主な対象としただ円運動では、飛行後のすべりが比較的生じ難い状態にあると考えられ、往復運動の場合のみ飛行後のすべりが生ずることが認められるので、往復運動のみについて、飛行後のすべりを考慮した。

### 3. すべりおよび飛行運動を含む運動状態と網下率との関係

第11, 12図は、 $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$ 、振幅70mmの往復運動、だ円運動 (振幅比  $b/a = 1/2, 1/3, 1/4$ ) の Counter-flow, Con-flow と  $a = 70\text{mm}, \beta = 0^\circ$  の円運動の Counter-flow で、供給量  $F_2 = 3220\text{kg/hour}, F_3 = 4570\text{kg/hour}, F_4 = 5880\text{kg/hour}$  の場合の振動数とすべり運動の位相範囲当りの網下率 (網下率 / すべり運動の位相範囲) との関係を示す。

第4~7図から明らかのように、すべり運動が認められる振動数90~130rpmにおいて、高い網下率を示しているにもかかわらず、すべりの運動の位相範囲が2~4ラジアン、すなわち、粒子のすべり運動の位相範囲は、1サイクルの約30%から60%にも達するので、すべり運動の位相範囲当り網下率は15%~45%と低い値になる。

しかしながら、すべりの運動の位相範囲当り網下率は、振動数の増加によるすべり運動の位相範囲の増大にもかかわらず一定の値となる。このことは、網目からの粒子の漏下率がほとんど変わらないことを示すものであるから、性能を向上させるためには、網長を長くすることにより、その目的は達成される。また、振幅を小さくして、すべりの運動範囲の増大により、網下率の増大を達成することも可能であろう。

すべり運動の位相範囲当り網下率はだ円運動の場合において、回転方向により多少異なるけれども、振幅比および供給量による差は明らかでない。

一方、飛行運動の推定される振動数140rpm以上では、飛行運動の増大によるすべり運動の位相範囲の減少によって、すべりのみの場合に較べて、低い網下率 (第4~7図参照) となるにもかかわらず、第7, 8図から明らかのように、すべり運動の位相範囲当り網下率はす

べりのみの場合に較べて、約50~80%と高い値になっている。その中で、往復運動の場合には、すべりの運動の位相範囲当り網下率はだ円および円運動に較べて、振動数の増加とともに、急激に低下する傾向がある。

以上の結果から、選別は粒子が網目に接して行なわれるものであるから、すべりの運動に着目し、飛行運動を含むときの飛行前のすべりとすべりのみの運動の場合のすべり運動は同じ状態であろうと仮定するならば、飛行前のすべりのときのすべりのもつすべり運動の位相範囲当り網下率とすべりのみのそれとは、ほとんど変わらないものと推定される。すべりのみの場合にくらべて、飛行を含む場合のすべり運動の位相範囲当り網下率の大きい原因は、明らかに、粒子が網面に着くときの状態、すなわち、粒子が網面を打つ強さ、網目への着地角度、飛行状態での粒子の整粒作用（例えば粒子の長軸を網目に直角方向に向ける）によるものであろうと推定される。

以上の考察から、飛行運動の場合には、粒子が網面に着地するときに、粒子の大部分が漏下して、網下率が高められるものと推定されるので、性能向上のためには、小振幅で大振動数の振動条件により、粒子の飛行運動の生ずる回数を多くすることにより、その目的は達成されるであろう。

なお、飛行運動における、着地時の粒子の姿勢、着地強度などについては、詳細に解析を行ない実験的に裏付ける必要があると考える。

### 摘 要

この研究は、往復、だ円および円運動の場合の粒子の運動（すべり運動）と網下率との関係を検討したものである。実験装置は4つの四棒リンクを振動源とする振動ふるいである。供試材料は大豆で、粒径を5.66mm < 粒径 < 6.73mm に整粒したものである。供試ふるい網は目開き（平均）6.9mm である。

粒子のすべりおよび飛行運動の始め、終りは式(1, 2,

3, 4) により計算した。主な結果は次の通りである。

1. 最適振動数は供給量と網面の運動形により変わり、最適振動数と示す網下率は供給量の増加とともに減少する。
2. すべりのみの運動の場合、すべりの運動の位相範囲は振動数の増加とともに増大するけれども、すべり運動の位相の範囲当り網下率はほぼ一定である。
3. すべりに飛行運動がともなう場合には、すべりの位相範囲が振動数の増加とともに減少する。
4. すべりの相の動運位範囲当り網下率について、すべり運動のみとすべりに飛行を伴う場合を比較するならば、後者は前者より可成り大きな値であった。
5. 高いふるい分け効率を得るためには、飛行運動における網面への粒子の突込み角とその強さを考慮する必要があることがわかった。

### 引用文献

1. FOWLER R. T and LIM S. C : Chem. Sci. **10** : 163-170, 1959
2. 岩尾俊男・田辺一・中尾清治：島根大農研報 **1** : 175-182, 1967
3. 岩尾俊男・川村登：農業機械学会誌 **33** : (1), 45-52, 1971
4. 岩尾俊男・川村登・田辺一：農業機械学会誌 **33** : (2), 163-172, 1971
5. 岩尾俊男・川村登・田辺一：農業機械学会誌, **33** (3), 274-278, 1971
6. 田辺 一・岩尾俊男：島大農研報 **2** : 173-178, 1968
7. KLUGE W : Erd. und Koh. **4** : 705-711, 1951
8. DAVIS E. R : Chem. Eng. **18** : 76-86, 1940

### Summary

This paper is the results of an experimental study on the rate of screening per ranged phase of the sliding motion of grains through the screen under the reciprocating, elliptical and circular motions.

This apparatus consists of a continuous vibrating screen with 4 four-bar linkages. The opening size of the screen was 6.90 mm, and the size of sample of soy-bean used for the screening test was  $5.66 \text{ mm} < \text{grain size} < 6.73 \text{ mm}$  screened during ten sec. by the standard testing sieve of a *Ro-tap shaker*.

The starting and ending condition criteria of grains on the screen surface for these various motions of the screen can be determined from the equations (1. 2. 3. 4), excepting the negative sliding and rolling motions of a grain.

The main results are as follows :

- 1) Though the optimum frequency varied according to the feeding rate and the oscillating types of the screen, the screening rate of the optimum frequency was decreased with the increase in the feeding rate.
- 2) In the case of only sliding motion of grains, the rate of screening per sliding ranged phase was nearly constant, though the range phase of sliding motion increased with the increase in frequency.
- 3) In the case of motion including both sliding and jumping of grains, the ranged phase of sliding was decreased with the increase in frequency.
- 4) Comparing the sliding motion with the motion including both sliding and jumping, the rate of the screening per ranged phase of sliding of the latter was considerably greater than that of the former.
- 5) It was found that, in order to get a high efficiency, it might be necessary to consider the angle of incidence and the impact force to the surface of the screen for the jumping grains.