

混合物の分離に関する基礎研究 (第1報)[※]

摩擦係数差利用の分離について

岩尾俊男^{※※}・田辺一^{※※}

Toshio IWAO and Hajime TANABE

Studies on the Physical Properties of Grains to be Separated (I)
Separating by the Difference of Friction Coefficient.

I 緒言

混合物の機械的分離には混合材料の摩擦係数が関与する。振動ふるいにおけるふるい分けの機械的条件すなわち振動数、振動形、振幅、振動方向および網の傾斜角などは摩擦係数を利用して、被分離材料を網面上により早く、有効に導く方策で、材料の摩擦係数、比重などの違いによって、与えるべき機械的条件も異なる。これまでは¹⁾²⁾³⁾主として、この機械的条件の付与の仕方を中心に研究を進めてきたが、分離すべき材料間の摩擦係数の差とこれらの条件との関連をつける意味において、別の前提として穀粒の摩擦係数の研究も進めてきた。なお穀粒材料間にはそれぞれ特有の摩擦係数があり、振動を適当に組み合わせて、玄米ともみを分離する装置も開発実現されているが、本研究は、農家が自作しうような、摩擦係数を利用した簡単な分離装置⁴⁾⁵⁾⁶⁾の可能性を研究したものである。

II 理論的考察

摩擦係数の異なる2成分よりなる供給材料の分離が摩擦係数差のみに行なわれると仮定した場合は、一方の粒子の摩擦角より大きく、一方の粒子の摩擦角より小さい傾斜角をもった傾斜板上に材料を置けば、傾斜角より小さい摩擦角の粒子は傾斜板をすべり落ち、大きい粒子は傾斜板上にとどまる。この場合、分離は原則的に完全に行なわれる。しかし、実用的に、連続的分離を行なうためには、傾斜板上にとどまる粒子を排除する必要があるので、傾斜板面を上方向あるいは横方向に移動させ、常に分離面がきれいにされる必要がある。

いま、傾斜面を第1図のような機構とし、ベルトが一定速度 V で X 方向に移動するものとする。傾斜面上の一点 O を原点とし、傾斜面上に慣性系座標軸 x, y 、ベルト上の1点 O_1 を原点としベルト上の運動系座標軸を X, Y とする。

ベルトの動く方向を負とすると、運動系に対する質点の運動方程式は、

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{X} &= mg \sin\beta - F \\ m\ddot{Y} &= N - mg \cos\beta \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

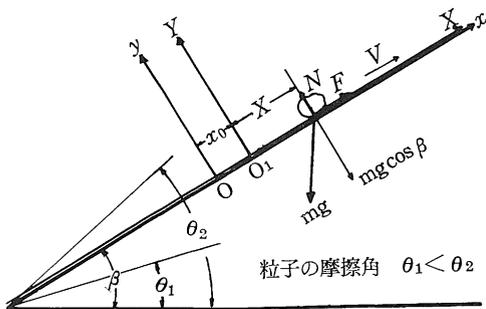
ただし、 $F = \mu mg \cos\beta$ 、 N は粒子に作用する垂直反力で、 $N = mg \cos\beta$ 、 F は摩擦力、 μ は摩擦係数、 β は傾斜角である。

a) 粒子がベルト上をすべる場合

(1)式より

$$\begin{aligned} \ddot{X} &= g \sin\beta - \mu g \cos\beta \\ &= g (1 - \mu/\tan\beta) \sin\beta \\ &= g (1 - R) \sin\beta \end{aligned} \dots\dots(2)$$

ただし、 $R = \mu/\tan\beta$



第1図 傾斜板上の粒子に作用する力の関係

※ 農業機械学会関西支部講演 (1969年) 岐阜
 ※※ 農業機械工学研究室

粒子の速度および変位は、積分し、初期条件を $t = 0$ のとき $\dot{X} = V, X = 0$ とすると、

$$\dot{X} = g(1-R)t \sin\beta + V \quad \dots\dots(3)$$

$$X = Vt + g(1-R) \frac{t^2}{2} \sin\beta \quad \dots\dots(4)$$

ある時間経過後の粒子の慣性座標系に対する関係は、第1図より、

$$\begin{aligned} x &= X + x_0 \\ &= Vt - g(R-1) \frac{t^2}{2} \sin\beta - Vt \\ &= -g(R-1) \frac{t^2}{2} \sin\beta \quad \dots\dots(5) \end{aligned}$$

ただし、 x_0 は $-Vt$ である。(5)式は粒子の慣性系に対する変位を示す。粒子の変位は時間の2乗に比例して変化する。 $R > 1$ の場合、すなわち、粒子の摩擦角が傾斜角より大きくなった場合には、粒子は上の方向に搬送される。 $R < 1$ の場合、粒子の摩擦角が傾斜角より小さい場合には粒子は傾斜面をすべり落ちる。 $R = 0$ の場合、粒子の摩擦角と傾斜角が等しくなったときには、粒子は相対静止の状態となり傾斜面上にとどまる。これらのことから、摩擦係数差を有する2つの粒子はそれぞれ $R > 1$ と $R < 1$ の条件を満足することにより、分離が可能になる。

また、 $R > 1$ で、粒子がある一定の高さから落された場合、粒子の下向きの速度が減速され、粒子がベルト上において静止し、ベルトとともに上向きに動くには、 $X = 0$ のときであるから、これに要する時間と変位は、(2)式より

$$t_0 = \frac{V}{g(R-1)\sin\beta} \quad \dots\dots(6)$$

変位は

$$\begin{aligned} x_{t=t_0} &= g(1-R)\sin\beta \frac{V^2}{2\{g(R-1)\sin\beta\}^2} \\ &= -\frac{V^2}{2g(R-1)\sin\beta} \quad \dots\dots(7) \end{aligned}$$

また、静止後の変位は

$$\begin{aligned} x &= x_0 + X \\ &= Vt - \frac{V^2}{2g(R-1)\sin\beta} \quad \dots\dots(8) \end{aligned}$$

ベルト上における粒子の静止時間はベルト速度 V に比例して大きくなる。また、静止距離はベルト速度 V の2乗に比例する。静止後の粒子の運動は、ベルトの速度と同じとなる。すなわち、粒子はベルト上において静止のまま上向きに搬送される。

第2図は、時間を横軸に、変位を縦軸にとり傾斜角 $\beta = 20^\circ$ の場合の粒子のすべり運動を、(5)、(6)、

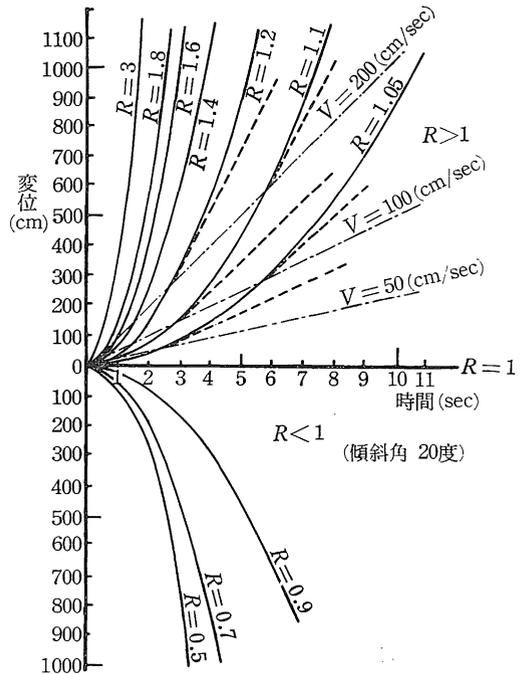
(7)、(8)式によって計算した一例である。 $R = 1$ の線は横軸に一致する。第1象限の曲線は $R > 1$ のときで粒子が上方向に搬送される時の状態を示す。この場合、実線で示す曲線は、(5)式による運動であり、この曲線とベルトの速度を示す直線との交点の座標が(6)、(7)式により計算された点である。この点は、ベルト上において粒子が静止する点である。その後の粒子の運動は破線に沿って運動を行なう。

ベルト上において粒子が静止するまでの時間は、 R が大きくなるほど、傾斜角に対する摩擦係数の比が大きくなるほど小さくなる。反対にベルトの速度が増加すると大きくなる。

$R < 1$ の範囲は、粒子が流下する場合で、 R が小さくなるほど流下曲線の勾配が大きくなり流下速度が大きくなる。この場合の粒子の運動は、ベルトの速度に関係なく流下曲線に沿って流下する。

b) 粒子がベルト上をころがる場合

穀粒のように球形に近い粒子では、傾斜面上での粒子の運動はしばしばころがりの現象となる。そこで簡単にするために、粒子の形状をほぼ球形とし、穀粒の半径を r 、摩擦力を F 、ころがりの回転角度を ϕ とし、下方向へのころがりのみを考える。ころがりの場合の運動方程式は前述の(1)式と重心まわりのトルクところがりの条件より



第2図 粒子の運動線図

$$m\ddot{X} = mg \sin\beta - F$$

$$Fr = \frac{2}{5}mr^2\phi \quad X = r \cdot \phi \text{ より}$$

$$F = \frac{2}{5}m\ddot{X} \quad \dots\dots(9)$$

$$(1) \text{式より } m\ddot{X} = mg \sin\beta - \frac{2}{5}m\ddot{X}$$

$$\frac{7}{5}m\ddot{X} = mg \sin\beta$$

$$\therefore \ddot{X} = \frac{5}{7}g \sin\beta \quad \dots\dots(10)$$

$$\text{よって } F = \frac{2}{7}mg \sin\beta \quad \dots\dots(11)$$

(1) 式より反力 N は、 $N = mg \cos\beta$ で $F \leq \mu N$ のときにころがるわけであるから、その条件は

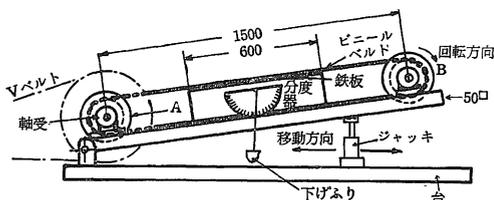
$$\frac{2}{7}mg \sin\beta \leq \mu mg \cos\beta$$

$$\frac{2}{7} \leq \mu / \tan\beta \text{ あるいは } R \geq \frac{2}{7} \quad \dots\dots(12)$$

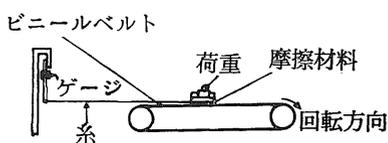
ころがり始めは $R \geq \frac{2}{7}$ のときに生ずる。粒子を球とした場合のころがり始めの条件は、(12)式より $\mu \geq \frac{2}{7} \tan\beta$ であるのに対し、すべりのみの方は $\mu < \tan\beta$ で μ が同じであればころがり始めはすべり始めより小さい傾斜角で運動が始まる。

III 実験装置および実験方法

第3図は実験装置の概略図である。摩擦面となるベルト（ビニール、幅50cm、厚さ0.1cm）は、プーリーA、Bにより張られ、Aは駆動軸として駆動される。摩擦面となるベルトは表面を均平に保つためベルトの裏側から鉄板（3mm）により、有効長さ60cmを支持した。



第3図 実験装置



第4図 摩擦係数の測定方法

ベルトの速度は無段変速機により 0~200cm/sec、また傾斜角は 0~90° まで任意に変えられる。傾斜角の測定は分度器と下げふりにより最小1°単位まで測定した。

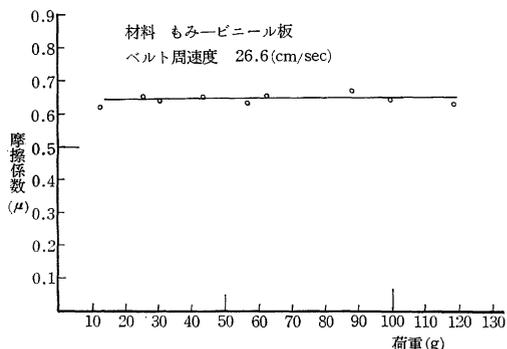
供試の摩擦試験用材料は厚さ 0.5cm、長さ 1.5cm、幅 1.0cm のベニヤ板の裏面に種々な摩擦材料となる砂ペーパー、皮、布、紙、もみ、玄米、わら等を張り付けたものである。

第4図はその摩擦係数の測定法の概略である。摩擦係数はベルト上に置かれた供試材料に加わる垂直荷重と摩擦力の関係から求めた値である。

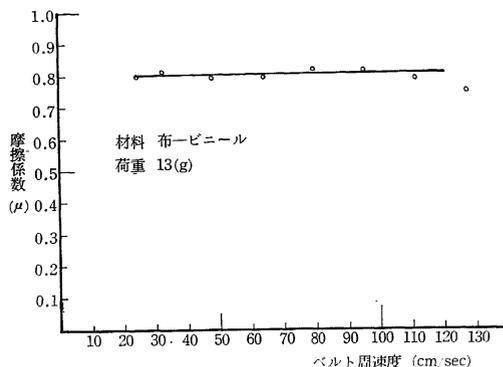
第5図は供試材料に加えた垂直荷重と摩擦係数⁵⁾の関係を示す1例である。摩擦係数は垂直荷重 0~120g の範囲ではほぼ一定と考えられる。荷重が 200g 以上になると摩擦力の変位が大きくなり十分な測定ができなかった。

第6図はベルトの周速度と摩擦係数⁵⁾の関係を示す1例である。摩擦係数は、ベルト周速度が 0~100cm/sec の範囲ではほぼ一定とみなせるが、この範囲を越えるとベルトの二次振動などで十分な接圧が得られないために摩擦係数はしだいに減少するようである。

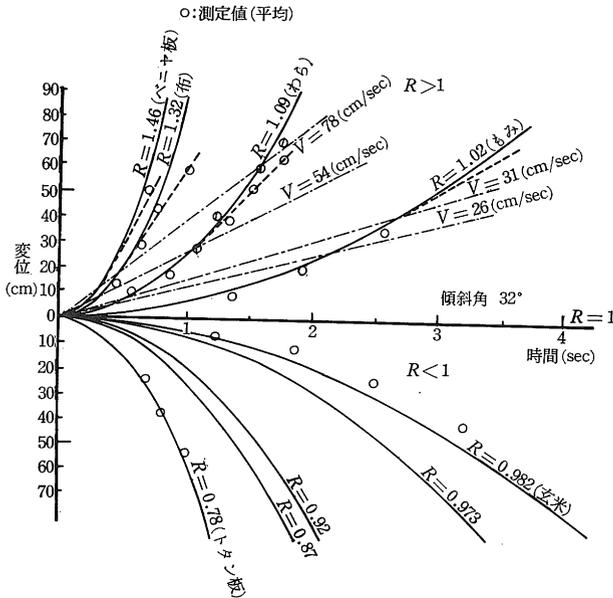
これらの結果より本実験に用いた供試材料はできるだ



第5図 もみービニールにおける荷重と摩擦係数の関係



第6図 布ービニールにおけるベルト周速度と摩擦係数との関係



第7図 粒子の運動線図

け農産物(穀粒)の大きさに近い大きさにするために、1gとし、ベルトの周速度は0~100cm/secとした。なお、上記の方法による摩擦係数の最大値は傾斜面利用による摩擦係数値にほぼ一致する。

供試材料の流下、搬送時間はストップウォッチにより計測した。

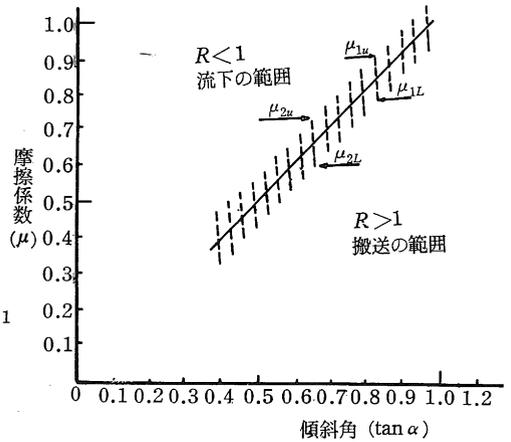
IV 実験結果および考察

1. 粒子の運動について

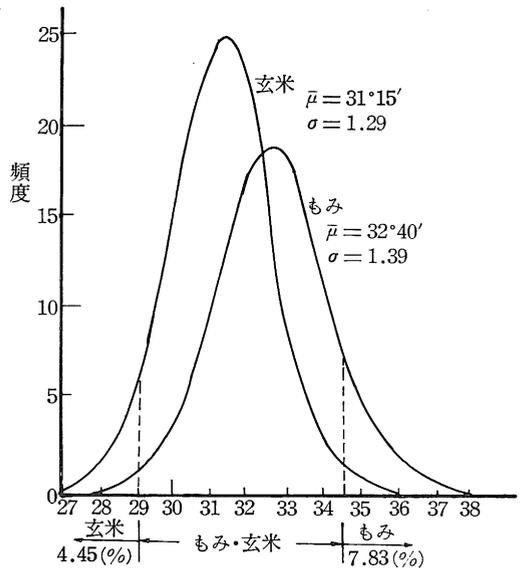
第7図は傾斜角 32° で落下高さ0cmのときの粒子の運動状態を示す。 $R=1$ は粒子の摩擦角および傾斜角が 32° のときである。 $R>1$ の範囲は粒子の摩擦角が傾斜角 32° より大きい場合で、粒子は上方向に搬送されることを示す。 $R=1.46$ はベニヤ板(摩擦係数 $\mu=0.90$)、 $R=1.318$ は布($\mu=0.81$)、 $R=1.098$ ははわら($\mu=0.675$)、 $R=1.02$ はもみ($\mu=0.65$)、 $R=0.982$ は玄米($\mu=0.613$)、 $R=0.780$ はトタン板($\mu=0.49$)で実験値はほぼ計算値に一致する。 $R>1$ の分離の条件は、できるだけ短い時間、距離でベルト上の粒子が静止することであり、一方 $R<1$ の分離の条件は、短い時間に大きい変位を有することである。これらのことから、2つの摩擦係数の異なる粒子の混合物の分離条件は、粒子の摩擦係数差の大きいことが必要である。

2. 粒子の分離限界について

第8図は駆動ベルト上における供試材料の傾斜角に対する摩擦係数の搬送・流下の分離限界である。 β —一定



第8図 摩擦材料の分離限界

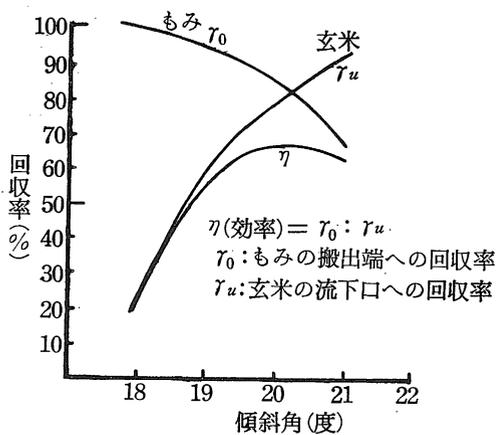


第9図 玄米ともみの摩擦係数の正規分布

として摩擦係数を測定した場合の摩擦係数の上限・下限を連結すると、 $R=1$ の線を中心に搬送から流下までの流下、搬送の入り混る状態のある幅ができる。この中にはその摩擦係数のほぼ25%前後である。下限の下限線以下は $R>1$ の範囲となり搬送の範囲を示す。上限線以上の範囲は $R<1$ の場合で粒子の流下を示す。いま、摩擦係数の異なる粒子の摩擦係数の上限、下限を第8図より、 μ_{1u} 、 μ_{1L} と μ_{2u} 、 μ_{2L} としたときの完全分離の条件は、

$$\mu_{1L} > \mu_{2u} \quad \dots\dots\dots (13)$$

そのときの分離の適正角度 R_A は、 μ_{1L} と μ_{2u} との中間で、



第10図 玄米，もみについてのベルトの傾斜角と回収率

$$R_A = \frac{\mu_{1L} + \mu_{2u}}{2 \tan \beta} = 1 \quad \dots\dots(14)$$

第9図は、玄米ともみの静止摩擦係数の分布範囲で正規分布曲線を示す。この場合の玄米の摩擦角の平均値は $\bar{\mu} = 31^\circ 15'$ 、標準偏差 $\sigma = 1.29^\circ$ 、もみは $\bar{\mu}_2 = 32^\circ 40'$ 、 $\sigma = 1.39^\circ$ であった。よって適正傾斜角は $\frac{\bar{\mu}_1 + \bar{\mu}_2}{2} = 31^\circ 54' \approx 32^\circ$ となる。しかし、この角度では2つの成分の粒子が混入しているため分離は不可能である。分離の建て前からすると、玄米、もみの摩擦係数の約1%の範囲を無視し概略的にもみ、玄米をかなりの精度で回収出来る傾斜角度と回収率は、玄米については、傾斜角 $29^\circ 02'$ で4.45%、もみについては、傾斜角 $34^\circ 30'$ で7.83%である。よってもみと玄米の摩擦係数差による分離は摩擦係数においてあまり差がないため精度のよい分離を期待することは困難である。このように、粒子の摩擦係数の正規分布曲線は分離精度を判定する一方法として用いることもできる。

なお、(12)式より第9図の値を用いて計算すると、もみ、玄米粒子のころがり始めの傾斜角は $\beta = 63^\circ 21'$ 、 $\beta = 62^\circ 21'$ 以下となる。したがって、もみ、玄米を用いた場合、ビニール板上ではすべりのみの場合はありえない、粒子は必ずころがり流下する。したがって、ころがりを伴う場合の選別性能は調査の必要がある。この結果は第10図のとおりである。

第10図はおもにころがりを伴う運動の場合で、玄米100粒、もみ100粒の混合材料をベルト速度35cm/secで高さ2cmより落下供給した場合の傾斜角と回収効率の関係を示す1例である。 r_0 はもみの回収効率、 r_u は傾斜板下方への玄米の回収効率、 η は両回収効率の積である。この場合、玄米をかなりの精度で回収するための傾

斜角と回収率は傾斜角 18° 前後で回収率約20%程度、一方もみについては、傾斜角 23° で約22.7%であった。もみと玄米の分離については、摩擦係数、形状などの差が少ないので高い分離効率を得るにはこれら以外の分離要因についての検討が必要である。

今回の本研究においては、ベルト有効長が60cmであった。もしベルト有効長を長くすることにより、また傾斜角を適当にゆるくすることにより、粒子がすべりあるはいころがりを伴う粒子の場合においても分離効率の改善が期待できるかも知れない。

また、ころがらない形状の粒子ところがりやすい形状の粒子の分離については、(12)式より明らかなように、高い分離性能がえられることが期待されるだろう。

したがってこれらの研究により傾斜した移動ベルトによる分離法は、農産物（もみ、玄米など）の移送過程での予備分離の方法として期待されるものとなるであろう。

V 摘 要

本研究は、粒子の物理的性状がふるい分け性能を左右するものと考え、その物理的性状の中で、摩擦係数差のみを有する2つの粒子群より構成された混合物についての分離の可能性を検討したものである。実験機は上方向に移動するビニール布の傾斜平面である。

おもな結果は次のとおりである。

1. 粒子が傾斜面上をすべる場合で、 $R > 1$ の場合には粒子は傾斜面を上方向に搬送される。 $R < 1$ の場合には、粒子はベルトの速度に関係なく下方向に流下する。 $R = 1$ の場合には粒子は傾斜面上において静止の状態になる。
2. 摩擦係数差による分離は粒子の摩擦係数差が大きいほど精度のよい分離が得られる。すべりの場合の分離精度は粒子の摩擦係数の正規分布曲線から推定することができる。
3. もみと玄米のような摩擦係数の近似した粒子については、摩擦のみで高精度の分離は期待できない。
4. 斜面上を粒子がころがり始める条件は $R \leq \frac{2}{7}$ で、玄米、もみの場合は必ずころがりを伴う。
5. ころがりを伴う場合の回収率は、もみ、玄米において、それぞれ20%であった。傾斜角、斜面板を考慮することにより回収率は向上できる可能性がある。

引 用 文 献

1. 岩尾俊男・田辺一・中尾清治：島大農研報1：175—182, 1967.

- | | |
|--|--|
| 2. 岩尾俊男・川村登：農機学会講演要旨：155, 1967. | 5. 亘理厚：機械力学 共立 東京 1968, p. 16-17. |
| 3. 田辺一・岩尾俊男：島大農研報 1：1968. | 6. 高桑健：選鉱工学 共立 東京 1962, p. 94-102. |
| 4. TAGGART：Handbook of mineral dressing John Willy and Sons London 1954, p. 20-28. | 7. TIMOSHENKO and YOUNG：Engineering Mechanics McGraw-Hill London 1951, p. 433-439. |

Summary

This paper deals with the possibility of the separation of two groups of grains with the different friction coefficient, using the test pieces of various materials. The experimental apparatus is the moving sloped plane of vinyl cloth.

The main results are as follows ;

1. In the case of sliding motion of grain, the grain is conveyed upward under the condition of $R > 1$, on the contrary, slides down under the condition of $R < 1$ notwithstanding of belt speed, and remains continuously at any point of the inclined plane under the condition of $R = 1$.
2. As the separating efficiency increases with the larger difference of sliding friction coefficient of grains, when the separation is done by it, the normal distribution curves of the sliding friction coefficient of grains may be of value.
3. The difference of the sliding friction coefficient between paddy and rice is so small that the separation may be almost impossible, even if the better separation is expected.
4. For the spherical grain, the initial condition of grain to roll down is $R \leq 2/7$, then the motion of paddy and rice are done by both rolling and sliding.

The efficiencies of regain of paddy and rice under this condition are the values of about 20%, respectively, and the improvement of the efficiency of regain may be impossible.