

粒体および可撓体の動摩擦係数の測定について

田 辺 一[※]・岩 尾 俊 男[※]

Hajime TANABE and Toshio IWAO

Measuring of Kinetic Coefficient of Friction of Grain and Flexible Material

緒 言

穀粒およびわら等の分離または搬送過程において摩擦係数はその運動状態を左右する大きな要素で、その運動状態を解明するために、各種の搬送条件における静摩擦係数と動摩擦係数を詳細に調べる必要性が痛感される。

従来、傾斜あるいは引張りによる方法等により静摩擦係数の多くの研究が報告されているが⁽²⁾⁽³⁾⁽⁶⁾⁽⁹⁾、動摩擦係数の研究は比較的少なく、とくに、網と穀粒の間の動摩擦係数の研究はほとんど見当たらない。

本研究は、摩擦の *mechanism* を調べるのではなく、穀粒の運動解析に必要な、静、動摩擦係数とくに後者の、振動中の網面あるいは板面等と穀粒との間の動摩擦係数およびわら等と金属面との間の動摩擦係数を比較的簡単に測定する方法について研究を行なったものである。

穀粒の摩擦係数の測定には、*circular motion* を、わら等の摩擦係数の測定には、プーリへの巻き掛けによる方法を用いた。

I 理論的考察

1) *circular motion* を用いた場合の穀粒の摩擦係数
Fig. 1 に示すように、垂直軸を中心に ω の角速度で回転する円板上の任意の半径 x_1 上の穀粒について考える。

円板面と穀粒との間の摩擦係数を μ 、遠心力を $F = m\dot{x} = \mu mg - F$ (1)

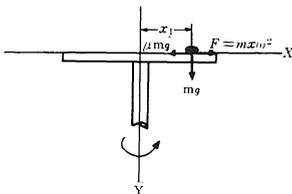


Fig. 1 Schema of motion of grain under the circular motion.

$mx_1\omega^2 = \frac{W}{g}x_1\omega^2$ とする。穀粒の回転円板の半径方向の運動方程式は

いま、回転中の円板上の穀粒に作用する力が、遠心力つとり合う半径を x とすると、その穀粒は平衡状態にあるから、

$$\dot{x} = 0 \quad \ddot{x} = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

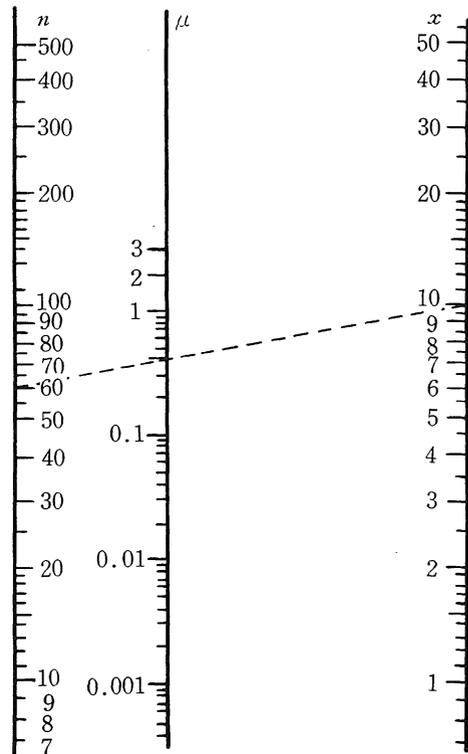


Fig. 2 Nomogram of the coefficient of friction.
 x : Radius balancing the friction to the centrifugal force of grain (cm)
 n : Frequency of the plane (rpm)
 μ : Coefficient of friction.

※ 農業機械工学研究室

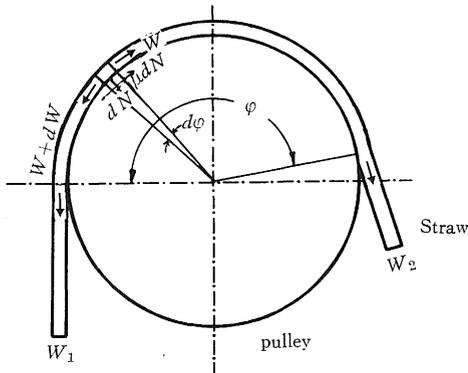


Fig. 3 Schema of twining of straw to the pulley.

(1)と(2)の関係から

$$\mu = \frac{x\omega^2}{g} \dots\dots(3)$$

ここに、 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ であるから、ただし、 n は回転数 (rpm)

$$\mu = \frac{x}{g} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \doteq 1.12 \cdot 10^{-5} x n^2 \dots\dots(4)$$

(4)式の関係をもグラフに示すと Fig. 2 の通りである。よって摩擦係数は回転数 (n) と穀粒半径 (x) とにより計算される。

2) プーリへの巻き掛けによるわら等の摩擦係数 ⁽¹⁾⁽⁷⁾

Fig. 3 のように回転するプーリにわら等が巻き付いたものとする。張り側およびゆるみ側の張力が W_1 および W_2 であるとする。巻き付いているわらの任意の要素について力の関係を考えて、両端に作用する張力 W および $W+dW$ があるものとする。わら等がプーリを圧す力を dN とするとこれらの中に μdN の摩擦力がある。 μ は摩擦係数である。いま、遠心力が働かないものとして、これらの力が平衡状態にあると考える。

半径方向では

$$\begin{aligned} dN &= W \sin \frac{d\phi}{2} + (W+dW) \sin \frac{d\phi}{2} \\ &= (2W+dW) \sin \frac{d\phi}{2} \dots\dots(5) \end{aligned}$$

そこで、 $\sin \frac{d\phi}{2}$ を級数に展開すると(5)式は

$$dN = (2W+dW) \left(\frac{d\phi}{2} - \frac{(d\phi)^3}{2^3 \cdot 3!} + \frac{(d\phi)^5}{2^5 \cdot 5!} - \dots \right)$$

高次の項を省略すると

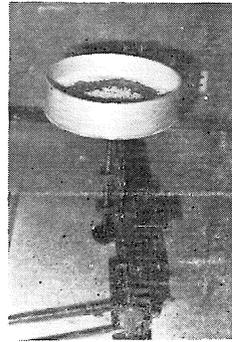


Fig. 4 Measuring apparatus applying the circular motion.

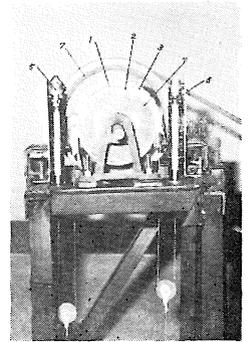


Fig. 5 Measuring apparatus applying the twining.

Table. 1 Comparison of the coefficient of friction by the some measuring methods.

Combination of test materials	Circular motion		Inclining method μ_s	Pulling method μ_k
	μ_s	μ_k		
Screen—Husked rice (open area 1.5mm)	0.482	0.355	0.488	0.550
Screen (open area 3.3mm) —Paddy	0.450	0.470	0.542	0.608
Screen (open area 1.5mm) —Paddy	0.576	0.505	0.837	0.677
Veneer—Paddy	0.446	0.397	0.333	0.478
Veneer—Paddy	0.607	0.489	0.442	0.563
Sheet-zinc —Husked rice	0.335	0.315	0.382	0.418
Sheet-zinc —Paddy	0.415	0.411	0.442	0.462

Note; water content: paddy 14.2%, husked rice 13.2%

μ_s : static coefficient of friction.

μ_k : kinetic coefficient of friction.

$$dN = Wd\phi + dW \frac{d\phi}{2}$$

第2項は微小であるから省略すると

$$dN \doteq Wd\phi \dots\dots(6)$$

接線方向では

$$W+dW = W + \mu dN$$

$$dW = \mu dN \dots\dots(7)$$

$$(6)と(7)式より dW = \mu W d\phi \dots\dots(8)$$

$$\frac{dW}{W} = \mu d\phi$$

積分すると

$$\int_{W_2}^{W_1} \frac{dW}{W} = \mu \int_0^\varphi d\varphi$$

$$\mu = \frac{1}{\varphi} \log\left(\frac{W_1}{W_2}\right) \quad \dots\dots(9)$$

すなわち、摩擦係数は巻き掛け角 φ と引張り側の力 W_1 とゆるみ側の力 W_2 がわかれば(9)式から計算される。

II 実験装置および実験方法

1) circular motion による場合

Fig. 4 はこの実験装置である。これは、 $\frac{1}{2}$ ps の原動機で無段変速機を介して水平駆動軸を回転し、ウォーム歯車により回転方向を変え、網面が垂直軸中心に水平面で回転する機構である。

この場合の静摩擦係数は、停止の状態で網面上に均一に穀粒を分散させたのち駆動させ、漸次回転数を増加させると任意の回転数において中央部に遠心力により飛散しなかった穀粒が円形に残る。その時の回転数と円形に残った穀粒の半径を測定することにより(4)式から摩擦係数が計算される。

また、動摩擦係数は任意の回転数で回転中の網面上に均一に穀粒を分散落させた場合に、中央部に円形に残った穀粒の半径と回転数から同じく(4)式により計算される。この場合、穀粒の落下の瞬時の網面上では穀粒が運動中と考えられるから明らかにこれは動摩擦係数である。

2) プーリへの巻き掛けによる場合

Fig. 5 はこの実験装置を示す。供試材料とプーリの間の動摩擦係数を測定しようとする場合、材料を完全にプーリに圧着させる必要がある。このため、実験装置は segment (10×8×10mm) (3) により供試材料(1)をプーリ(2)に圧着させるようになっている。また、巻き掛け角 (φ) は全円分度器(4)により、引張り側の力 (W_1) およびゆるみ側の力 (W_2) はそれぞれ 5 kg 用(5)、2 kg 用(6)のバネ秤により測定される。また、プーリは無段変速機を介して V プーリ(7)により駆動される。

動摩擦係数はプーリの駆動中に巻き掛け角 (φ)、張力 W_1 、 W_2 を測定し(9)式により計算する。

III 実験結果および考察

1) circular motion による場合の穀粒の摩擦係数について、

(a) 各種測定法との比較

Table. 1 は穀粒の摩擦係数の測定法として従来から

行なわれている傾斜および引張りと circular motion による場合の値を示す。

circular motion によれば、動摩擦係数は容易に測定出来るが、従来の方法では、その測定は困難である。静摩擦係数についてみると、傾斜法による値は他の方法による値より比較的大きい値になっている。

また、1分目の網では、引張りによった場合では、目詰りによるためにその値は他の場合より大きい値になっている。この結果から、とくに網と穀粒の摩擦係数の測定には circular motion を利用する方が適しているのではないかと考えられる。

また、circular motion によった場合、静摩擦係数より動摩擦係数が小さいのは当然であるが、その差は約10%以内であった。

Fig. 6 は、circular motion により測定した1例である。

(b) circular motion による場合の回転速度による影響

Fig. 7 は網(5分目)と玄米の摩擦係数の回転数による変化の状態を示す。この結果から、回転数約 80rpm 以下では回転数による静および動摩擦係数の変化はないものと考えられる。理論的には回転数が変化しても摩擦係数は変化しない筈である。回転数が約 80rpm を越えると、静および動摩擦係数が低下する傾向がある。これは、機構上から生ずる二次振動および網中央の穀粒半径が小さくなるための読み取り誤差等によるものと考えられる。

本実験機の使用可能範囲は、回転数の影響を受けない約 80rpm 以下である。

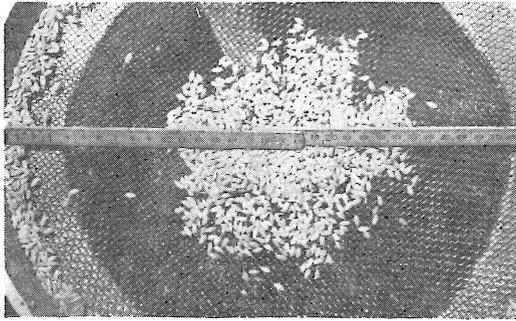
2) プーリへの巻き掛けによるわら等の動摩擦係数について、

プーリへのわらの巻き付きから動摩擦係数を測定する場合に、これに関係する外的要素として、巻き掛け経過時間と摩擦面間の相対速度が考えられる。この実験は、これらの関係を明らかにし、実験機の適応性を調べたものである。

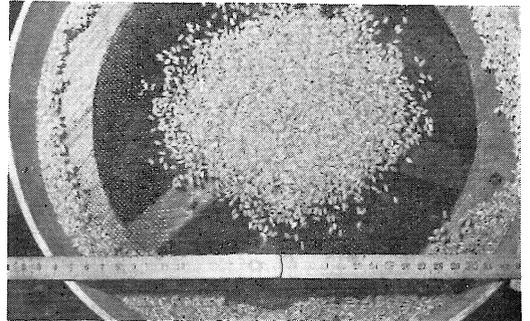
(a) 巻き掛け経過時間による影響

Fig. 8 は巻き掛け時間と動摩擦係数の関係を示す。駆動後3分以内における動摩擦係数は含水率の高い場合(62%)は減少し、含水率の低い場合(25%)は反対に増加の傾向がある。

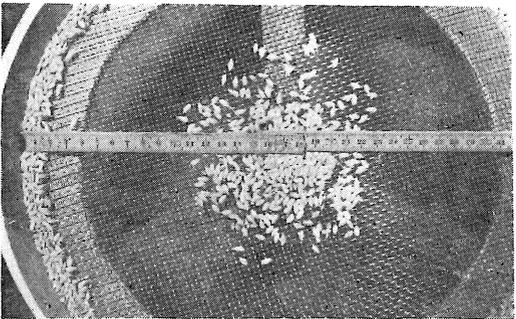
しかし経過時間約3分以上では、動摩擦係数は一定である。この関係は、次のように考えられる。すなわち、高速度あるいは高荷重のすべりでは、摩擦熱による温度上昇が著しく、接触部の摩擦係数が低下する。しかし、本実験のように、低速度あるいは軽荷重のすべりでは、



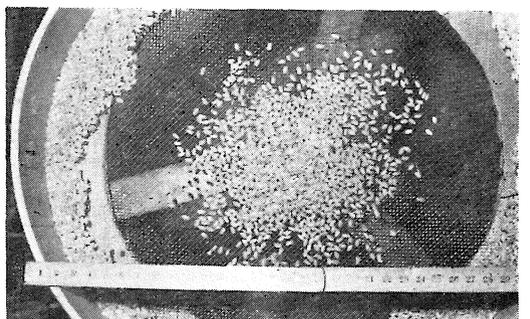
a. Screen-Paddy (open area 3.3mm)
 $\mu_s : 0.576$ (82 rpm)



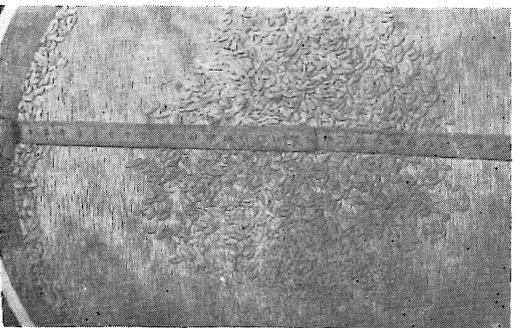
e. Screen-Husked rice (open area 1.5mm)
 $\mu_s : 0.482$ (58 rpm)



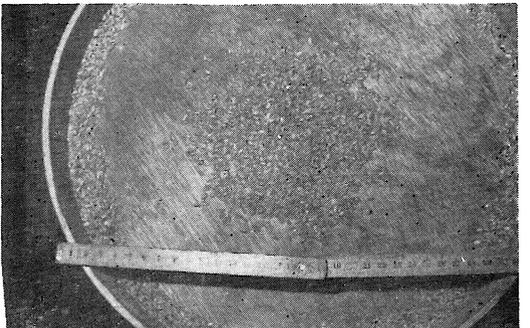
b. Screen-Paddy (open area 3.3mm)
 $\mu_k : 0.505$ (80 rpm)



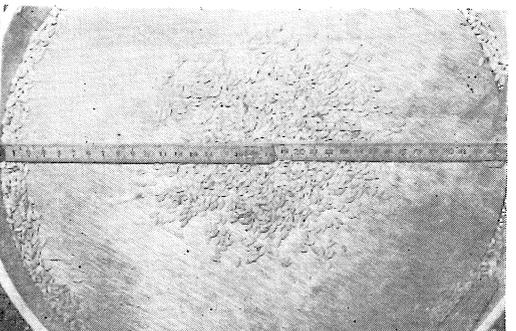
f. Screen-Husked rice (open area 1.5mm)
 $\mu_k : 0.355$ (46 rpm)



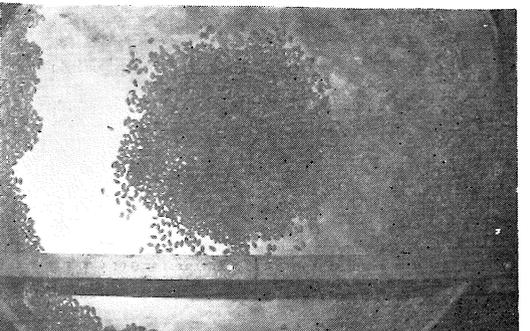
c. Veneer-Paddy
 $\mu_s : 0.607$ (75 rpm)



g. Veneer-Husked rice
 $\mu_k : 0.397$ (65 rpm)



d. Veneer-Paddy
 $\mu_s : 0.489$ (70 rpm)



h. Sheet-zinc-Husked Rice
 $\mu_s : 0.335$ (60 rpm)

Fig. 6 Some examples by the circular motion.

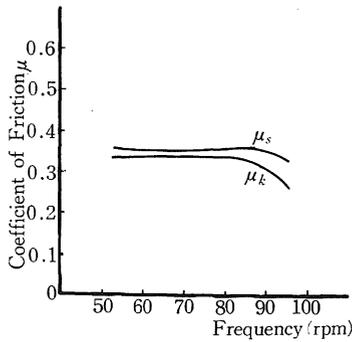


Fig. 7 Relation between the frequency and the coefficient of friction (husked rice-screen, open, area 3.3mm).
 μ_s : static coefficient of friction
 μ_k : kinetic coefficient of friction

摩擦熱による温度上昇が小さい上に、プーリの熱容量が大きいために温度は低く、したがって、接触面の性質を変化させるに至らず、摩擦係数がほとんど変らないものと考えられる。

また、経過時間に対する動摩擦係数のこれらの関係は、各種の搬送過程において、任意の経過時間に対する摩擦係数を適確に知る上においても意義がある。

(b) プーリの周速度と動摩擦係数

この測定では、巻き掛けのわらが常に静止の状態にあるから、摩擦面間の相対速度はプーリの周速度と等しいわけである。Fig. 9 は プーリの周速度と動摩擦係数の関係を示す。この場合のプーリの周速度は、遠心力の影響が無視できる 200cm/sec 以下の範囲⁽¹⁾である。測定は、

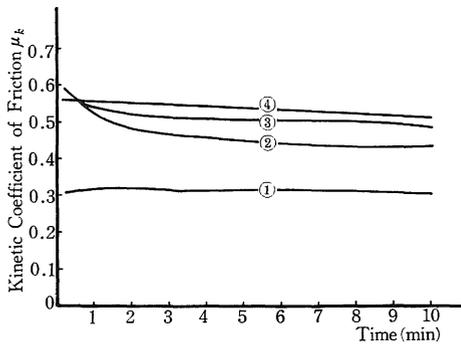


Fig. 8 Changing of the kinetic coefficient of friction after driving.

- (1) : Zebra grass blade, peripheral velocity 120cm/sec, water content 25%.
- (2) : Straw blade, peripheral velocity 100cm/sec, water content 50%.
- (3) : Grass blade, peripheral velocity 100cm/sec, water content 75%.
- (4) : Zebra grass blade, peripheral velocity 80cm/sec, water content 62.5%.

経過時間と動摩擦係数の結果より、約 3 分経過後は μ 定

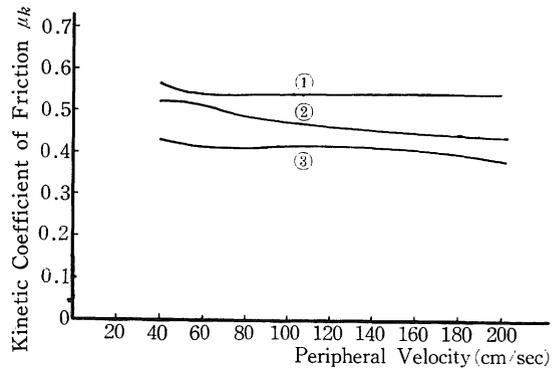


Fig. 9 Relation between the coefficient of friction and peripheral velocity of pulley.
 (1) : Zebra grass blade, water content 62.5%
 (2) : Straw blade, water content 50%
 (3) : Straw stalk, water content 75%

常状態になってから行なった。

その結果、動摩擦係数は周速度の増加とともにやや低下の傾向がある。とくに、わらの葉においては、この傾向が顕著である。

以上の関係から明らかなように、この方法によれば、任意の相対速度での動摩擦係数が測定される。

上述の 2 つの測定方法により比較的簡単に粒体および可撓体の動摩擦係数が測定される。今後はこの方法により含水率と摩擦係数の関係を検討する予定である。

摘 要

穀粒およびわら等の分離または搬送において摩擦係数はその運動状態を決める大きな要素である。だから、その運動を解析するに当たって、摩擦係数を正確に知る必要がある。この研究は、粒体については *circular motion* を、可撓体についてはプーリへの巻き掛けによる方法により、それぞれの動摩擦係数を測定しその適応性を研究したものである。次に主な点を要約すれば

1) *circular motion* による穀粒の摩擦係数の場合

- (1) 穀粒の摩擦係数は次式(3)で与えられる。

$$\mu = \frac{x\omega^2}{g} \quad \mu : \text{穀粒の摩擦係数}$$

x : 遠心力と平衡状態にある穀粒の半径 (cm)

ω : 角速度 (radian/sec)

g : 重力の加速度 (cm/sec²)

(2) 回転数との関係について、摩擦係数は回転数が約 80rpm 以下においては回転数の影響を受けずほぼ一定である。しかし、それ以上の回転数では、回転数の増加とともに漸次減少の傾向がある。

2) プーリの巻き掛けによるわらの摩擦係数の場合
 この場合、わらに作用する遠心力は無視した。

- (1) 動摩擦係数は次式(9)により計算される。

$$\mu = \frac{1}{\varphi} \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \quad \mu: \text{わらの動摩擦係数}$$

φ : 巻き掛け角 (*radian*)

W_1, W_2 : 引張り側およびゆるみ側の張力 (*kg*)

(2) 周速度を増加した場合、動摩擦係数は漸次減少する。しかし、その傾向は、巻き掛け物質とプーリーの性質により異なる。

(3) 比較的高い含水率のわらの摩擦係数は、駆動後3分間は減少の傾向がある。しかし、その後、摩擦係数は一定である。

以上の研究から、これら2つの実験方法は、粒体および可撓体の動摩擦係数の測定に十分役立つものと考えられている。

引用文献

- 1) 稲田重男・林則行・窪田雅男・北郷薫：機構学1957：朝倉，東京，213-215
- 2) 植松時雄・池森龜鶴・森芳郎・伊藤四郎：流休・固体

- 輸送工学ハンドブック1966：朝倉，東京，37-46
- 3) 農業機械学会編：農業機械ハンドブック1965：コロナ，東京，222-223
- 4) 曾田範宗訳：固体の摩擦と潤滑1961：丸善，東京，67-80，87-94
- 5) Bickert, W. G. and F. H. Buelow : Kinetic Friction of Grains on Surfaces. Transactions of the A. S. A. E. **9** (1) : 129-131, 1966
- 6) Richter, D. M. : Friction coefficients of some agricultural materials. Agricultural Engineering **35** (6) : 411-413, 1954
- 7) Wieneke, F. : Wickel und Reibungsuntersuchungen am Wellen und anderen umlaufenden Maschinenteilen. **23** : 463. 1-28, 1957
- 8) Snyder, L. H., W. L. Roller, and G. E. Hall : Coefficients of Kinetic Friction of Wheat on Various Metal Surface. Transactions of the A. S. A. E. **10** : 411-413, 1967
- 9) Brubaker, J. E. and J. Pos. : Determining Static Coefficients of Friction of Grains on Structural Surfaces. Transactions of the A. S. A. E. **8** : 53-55, 1965

Summary

The motion of grain and straw on the movable plane is subjected to influence by the coefficient of friction, therefore, in the investigation on the motion, knowing of the exact coefficient of friction is positively necessary. This paper deals with results of the experimental study on the coefficient of friction of grain and straw using circular oscillatory motion and twining to the pulley. The main results are as follow ;

1) In the static and kinetic coefficient of friction using circular oscillatory motion.

(1) In general, the coefficient of friction is given by the following equation (3).

$$\mu = \frac{x\omega^2}{g}$$

μ : static and kinetic coefficient of friction of grain

x : radius of circle of grain balancing to the centrifugal force (*cm*)

ω : angular velocity (*radian/sec*)

g : acceleration of gravity (*cm/sec²*)

(2) Regarding with the frequency, the coefficient of friction is kept in constant within about 80rpm, but decreases gradually over than about 80rpm.

2) In the kinetic coefficient of friction using the angle of contact on the pulley. In this case the centrifugal force applying to the straw is neglected.

(1) The kinetic coefficient of friction is given by the following equation (9).

$$\mu = \frac{1}{\varphi} \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right)$$

μ : kinetic coefficient of friction of straw

φ : angle of contact (*radian*)

W_1, W_2 : pulling force applied to the tight side and to the slack side, respectively (*kg*)

(2) Increasing of relative velocity between straw and pulley, the kinetic coefficient of friction decreases in gradually, but the tendency differs from the nature of contacting material and pulley.

(3) After driving, the kinetic coefficient of friction decreases gradually regarding with the contacting material having the high water content, but after about three minutes, it becomes to the constant value.

3) From upper results these methods can be easily able to measure the kinetic coefficient of friction.