

# 專 論

## 稻 穀 摩 擦 係 數 之 研 究

### Study on the Coefficients of Friction of Rough Rice

臺大農工研究所碩士

臺大農工系副教授

郝 瑞 珍

李 廣 武

R. J. Zou

Dr. K. W. Lee

#### ABSTRACT

The need for a knowledge of coefficient of friction of agricultural materials on various structural surfaces has long been recognized by engineers concerned with design of storage structures and mechanical handling and processing equipment. The objective of the study was to investigate the influence of varieties and moisture contents of rough rice on static and kinetic coefficients of friction on various surfaces. With this knowledge, we may possibly design more adequate warehouses and mechanical equipment for rice.

Three varieties of rough rice, i. e. Tsailai, Ponlai and long-grain rice were used in the experiments of static coefficient of friction on the steel, stainless steel and cement plates. In determining kinetic coefficient of friction, only steel plate and stainless steel plate were used.

An inclinable plane apparatus was built for measuring static coefficient of friction. The results indicated that surface materials had great effects on static coefficient of friction. The value was the highest on the cement surface and the lowest on the stainless steel surface. Varieties had no significant influence on static coefficient of friction both on steel and stainless steel surfaces. But on cement surface, the static coefficient of Tsailai was higher than those of Ponlai and long-grain rice. Static coefficients of friction on steel and stainless steel surfaces increased with an increase in grain moisture content. But on the cement surface moisture content had no significant influence.

An inclined plane with a photoelectric switch and a stopwatch was used in measuring the kinetic coefficient of friction. The results indicated that the kinetic coefficient of friction on steel surface was higher than that on stainless steel surface. Varieties had no significant influence. But kinetic coefficient of friction increased with an increase in grain moisture contents.

## 壹、前言

吾人已知欲設計合理之農產品倉儲、輸送或加工設備時，農產品在不同材料表面上之摩擦係數為重要之基本條件之一。例如在設計倉儲結構物時，欲決定倉壁材料及尺寸，必先估計倉壁壓力，而農產品在倉壁材料上之靜摩擦係數即為影響倉壁壓力大小之重要因子。又如穀物利用螺旋桿出倉時，在穀物開始流動前，施予之動力必先克服靜摩擦力，一旦穀物開始強制流動後，欲估計維持流動所需之動力，必須知道穀物之動摩擦係數。所以摩擦係數為農產品一項非常重要之物理性質。

稻穀是臺灣的主要農產品。近年來，由於倉容不足，且原有穀倉大多無進出倉機械設備，為此目前政府正積極興建現代化穀倉。本研究測定稻穀在不同材料表面上之摩擦係數，即可供給設計穀倉、輸送及加工設備時之用。

本研究之目的可分為兩部份：

### (一) 稻穀之靜摩擦係數：

1. 設計製作簡單型靜摩擦係數測定裝置。
2. 測定稻穀在不同材料板面上之靜摩擦係數。
3. 探求稻穀品種及含水率對靜摩擦係數之影響。

### (二) 稻穀之動摩擦係數：

1. 測定稻穀在不同材料板面上之動摩擦係數。
2. 探求稻穀品種及含水率對動摩擦係數之影響。

## 貳、文獻探討

### (一) 摩擦理論

當一物體在另一物體表面上有滑動趨勢或已經滑動時。此二物體恆相互施一與接觸表面平行之力，抵抗其相對運動，此力稱為摩擦力。作用於兩相對靜止物體表面間之摩擦力稱為靜摩擦力，起動瞬間之摩擦力即為最大靜摩擦力。作用於相對運動平面間之力則稱為動摩擦力<sup>(5)</sup>。

庫倫 (Coulomb) 氏於 1781 年最先提出摩擦力定律<sup>(5,8,9)</sup>，即未經滑潤之乾燥平面間之最大靜摩擦力  $F_s$ ，或動摩擦力  $F_k$ ，與垂直接觸面之正向力  $N$ ，有下列關係存在：

$$F_s = \mu_s N, F_k = \mu_k N$$

$\mu_s$  及  $\mu_k$  分別稱為靜摩擦係數及動摩擦係數。對特定之接觸平面，此二係數為常數，通常  $\mu_k$  比  $\mu_s$  數值稍小。庫倫定律詳述如下：

- (1) 最大靜摩擦力及動摩擦力皆與正向力成正比。

- (2) 摩擦力大小與外觀接觸面積 (Apparent area) 無關。

- (3) 摩擦力大小與滑動速度快慢無關。

- (4) 摩擦力與接觸物體之性質有關。

關於摩擦力之起因與性質，許多學者提出不同理論，重要者有 Amontons 氏之互鎖理論 (Mechanical Interlocking)，Ewing, Hardy 及 Tomlinson 三氏提出之分子引力理論 (Molecular Interactions)，以及 Holm, Bowden 及 Tabor 三氏之熔接理論 (Welding)<sup>(8,10,12)</sup>，但尚無任何一個單獨理論能完全解釋摩擦力之起因及性質。至今產生摩擦力之機構 (Mechanism)，仍未能被世人所完全了解。綜合各種理論，可以大致解釋摩擦力之起因<sup>(8)</sup>。

即使經小心處理精密磨光之表面，在精密顯微鏡下觀察，仍如同山峯及山谷一般凹凸不平，與真正理想平面相去甚遠。在此種平面上的物體乃是靠突出部分 (Asperities) 所支撐，實際接觸面積非常小，幾乎與外觀的接觸面積無關。局部之接觸點因承受強大壓力，可能產生彈性甚至塑性變形，直至接觸面積增加至足夠支撐正向力為止，因此真正接觸面積與正向力大小成正比，即使外觀接觸面積減小，真正接觸面積仍保持相同。由於接觸點受強大壓力作用，接觸點兩面之分子極接近，互相以分子力吸引對方。形成冷結合 (Cold-welded) 之附著現象。在滑動過程中，結合點 (Welded junctions) 不斷形成又撕裂 (Sheared)，同時較硬物體表面之突出點 (Asperities) 犁去 (Plow-out) 較軟物體之突出點，此即摩擦力起因之一。此外接觸面間之附着力及內聚力亦為摩擦力之起因。

在滑動過程中，動摩擦力產生之能量以熱能方式釋放，使接觸面溫度升高，升高速率視物體之導熱能力，滑動速率及負荷大小而定。由於物體溫度升高，物體強度及物理性質改變，摩擦係數因此可能改變。通常對於一般物質，滑動速率非常低時，動摩擦係數隨速度增加而增加，但在高速時，可能隨速度增加而減小或者不受影響<sup>(8)</sup>。

若滑動界面間存在水膜，由於水膜之表面張力作用，使摩擦係數增大，亦可能由於水膜存在，使接觸面之附着力減小，摩擦係數亦減小<sup>(8)</sup>。

許多實驗已證明，除極端粗糙或平滑之平面，摩擦力不受表面粗糙程度影響。有些生物體表面具

鱗狀物或茸毛，而使其摩擦係數具方向性<sup>(8)</sup>。

### (二) 農產品之靜摩擦係數

農產品靜摩擦係數為設計儲倉之重要因子之一。如設計圓筒深倉 (Silo) 時，欲決定倉壁之尺寸，必先估計倉壁所承受之側壓  $P_h$  及垂直壓力  $P_w$ ，一般常用 Janssen's Formula

$$P_{h,y} = \frac{wR}{\mu_s} \left(1 - e^{-\frac{k \mu_s y}{R}}\right)$$

$$P_{w,y} = wR \left(1 - e^{-\frac{k \mu_s y}{R}}\right)$$

式中  $P_{h,y}$ ：深度  $y$  處之倉壁側壓力，psi。

$P_{w,y}$ ：深度  $y$  處之倉壁垂直壓力，psi。

$w$ ：農產品容積密度，lb/in<sup>3</sup>。

$R$ ：圓筒深倉之水力半徑，in。

$\mu_s$ ：農產品之靜摩擦係數

$k$ ：倉內農產品所承受之壓力比

$$= \frac{\text{側壓力}}{\text{垂直壓力}}$$

影響農產品靜摩擦係數之可能因素為板面之處理情況、正向壓力、農產品之含水率以及環境條件等<sup>(1, 8)</sup>。

Richter 氏<sup>(1, 8)</sup> 利用水平旋轉圓盤裝置，測定麥稈等在鍍鋅鐵板上之靜摩擦係數，實驗板面固定在旋轉圓盤上，樣品則置於板面上。實驗結果顯示鍍鋅鐵板表面愈磨光，切碎麥稈在板面上之靜摩擦係數愈小。Brubaker 及 Pos<sup>(3)</sup> 兩氏利用水平等速移動之平台裝置，測定小麥之靜摩擦係數，實驗結果指出三夾板之含水率影響靜摩擦係數。Kramer 氏<sup>(7)</sup> 利用傾斜平台之裝置進行實驗，實驗結果顯示稻穀靜摩擦係數不受正向壓力影響。Richter 氏<sup>(1)</sup> 證實切碎之乾牧草及麥稈之靜摩擦係數不受正壓力影響，但含水率 72% 之切碎青草及 74% 之玉米芻株，靜摩擦係數隨正壓力增加而略減。許多實驗<sup>(1, 3, 6, 12)</sup> 皆顯示農產品含水率對靜摩擦係數之影響皆有相同的趨勢，即靜摩擦係數隨含水率增高而增加。但在特伏龍 (Teflon) 表面，農產品之水分可使表面潤滑，使得靜摩擦係數隨含水率增高而減小<sup>(3, 12)</sup>。環境之溫度及濕度影響附着在板面上之水分多寡及農產品表面含水量之高低，而使靜摩擦係數改變<sup>(12)</sup>。Kramer 氏<sup>(7)</sup> 實驗結果指出含水率 14% 之稻穀，品種不同時，

靜摩擦係數亦有差異，其結果如下：

板 面	品 種	
	Blue Rose	Rexora
鍍鋅鐵板	0.402~0.414	0.447~0.449
混凝土(磨平)	0.516~0.531	0.461~0.473
三夾板(與木紋方向垂直)	0.495~0.500	0.530~0.542
三夾板(順木紋方向)	0.435~0.440	0.500~0.506

至於含水率對稻穀之影響是否顯著，有進一步研究的必要。

### (三) 農產品之動摩擦係數

利用機械式或氣力式輸送設備輸送農產品，農產品直接在槽、外箱或其他機械部分上滑動，而產生摩擦並消耗部分動力，所以計算輸送設備所需動力時，應包括消耗於滑動摩擦之部分，而農產品之動摩擦係數是計算過程中重要因子之一。

## 叁、實驗材料與實驗裝置

### (一) 稻 穀

本實驗所採用之稻穀為民國 66 年第一期作在來稻、蓬萊稻及秈稻三種，均係民國 67 年 2 月自臺中縣大雅鄉農會購得。

### (二) 板 面

本實驗所採用之板面為倉儲、輸送及加工設備常用之材料。靜摩擦係數實驗採用 200 × 120 × 6 mm SS41 普通鋼板，200 × 120 × 6 mm SUS 304 不銹鋼板及 200 × 120 × 25 mm 水泥板三種。動摩擦係數實驗採用 500 × 120 × 6 mm SS 41 普通鋼板及 500 × 120 × 6 mm SUS 304 不銹鋼板兩種。

### (三) 靜摩擦係數測定裝置

靜摩擦係數測定裝置之設計如圖 1 至圖 5 所示。利用 6" 長的氣泡水平儀，調整旋轉盤上的平台至水平位置，將角度指標歸零。油筒中盛裝體積比 5:1 之 #40 機油與柴油混合液。由於阻尼器重力及混合液的粘滯性，阻尼器在油筒中等速緩慢下降，帶動旋轉圓盤依順時針方向作等角速轉動，旋轉盤上之平台隨之等角速傾斜，角速度為每分鐘 15 度。欲使平台恢復水平位置時，用手依逆時針方

向轉動圓盤，由於油筒中之阻尼器閥門被混合液向下沖開而洩油，阻尼器可以輕易快速被拉起，平台很快就恢復水平位置。若停止用手轉動圓盤時，阻尼器閥門被彈簧頂回至關閉位置。

平台上之閃光燈電路開關裝置如圖 2 及圖 3。

兩片薄銅片以電線分別接至閃光燈之正負極，此二銅片若接觸，可使充電之閃光燈閃亮。閃光燈及照相機固定於角架上，置於旋轉圓盤正前方約 1 米處，如圖 6 所示。

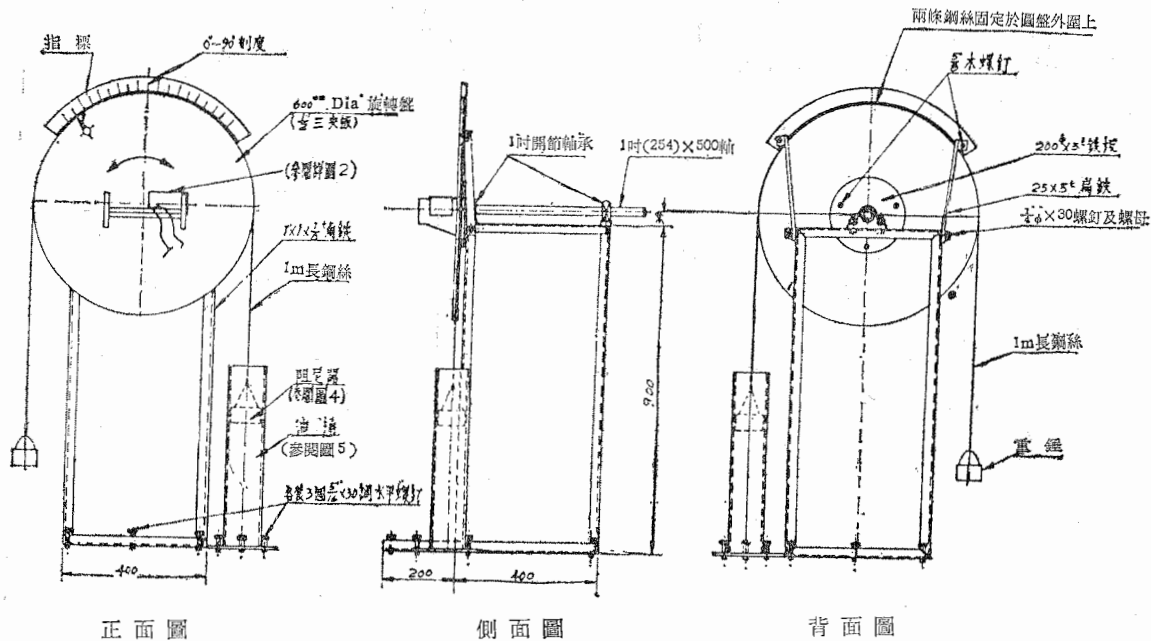


圖 1: 靜摩擦係數測定裝置  
單位:mm 比例:1:10

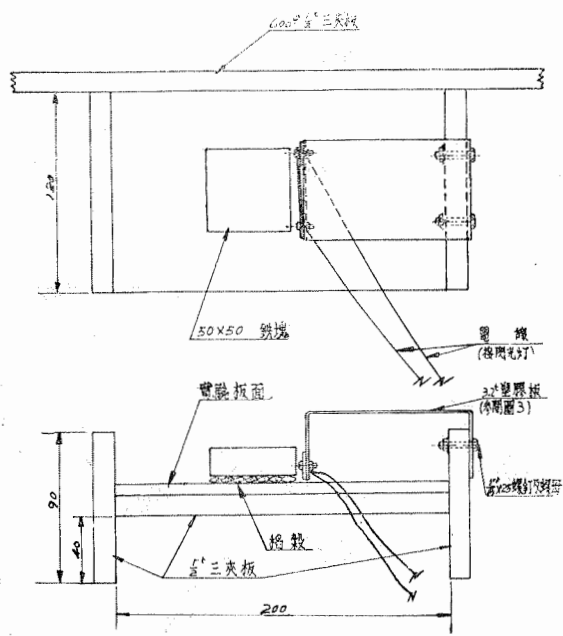


圖 2: 可傾斜平臺  
單位:mm 比例:1:2

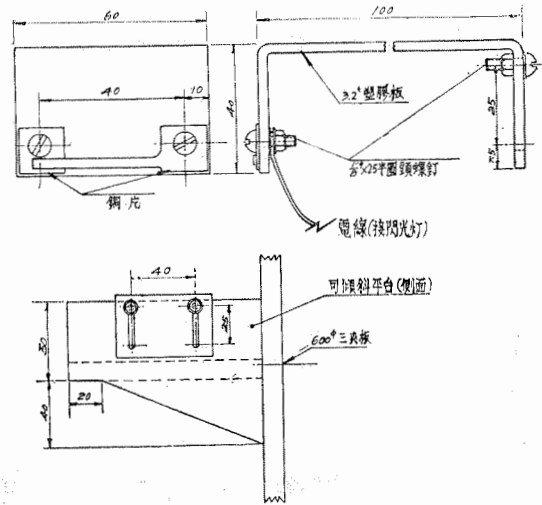


圖 3: 閃光燈電路開關裝置  
單位:mm 比例:1:1

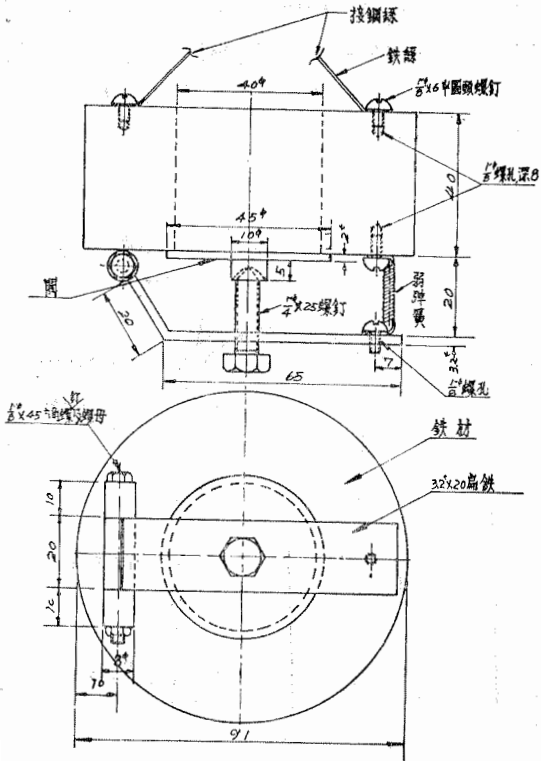


圖 4: 阻尼器 (DAMPER)  
單位:mm. 比例:1:1

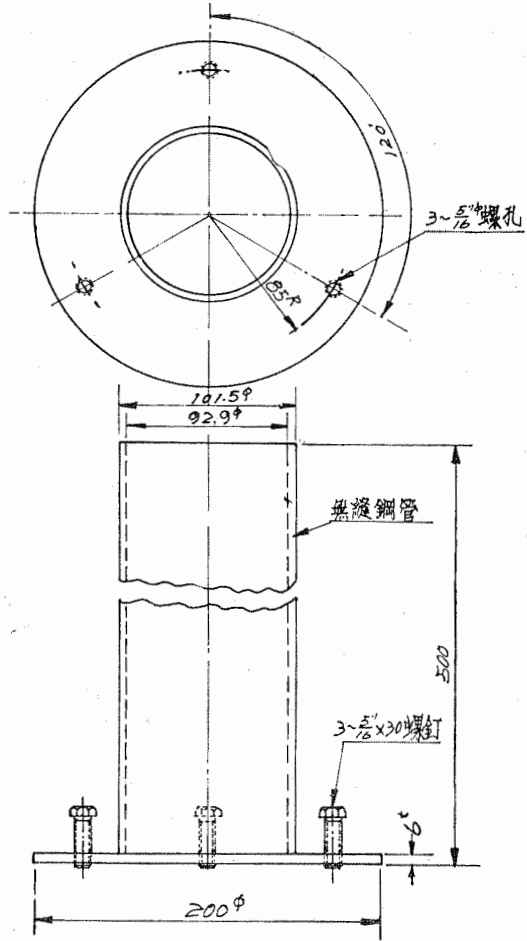


圖 5: 油 筒  
單位:mm. 比例:1:3

#### 四動摩擦係數測定裝置

動摩擦係數測定裝置包括傾斜板及一套光電管計時器，(Photoelectric Switch type PS-3, Digital Electric Stop Watch type LCD-1, SHIMADZU 公司出品) 如圖 7。傾斜板設計

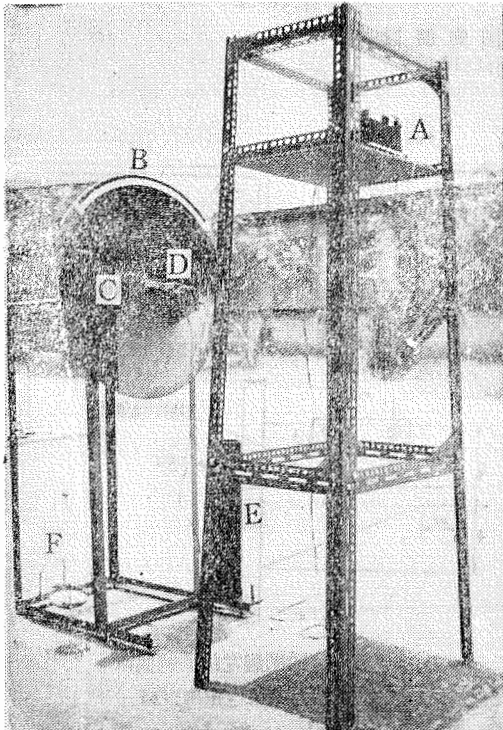


圖 6: 靜摩擦係數實驗設備

註: A: 照相機及閃光燈 D: 閃光燈電路開關  
B:  $0^\circ-90^\circ$  刻度 E: 油筒  
C: 平臺 F: 重錘

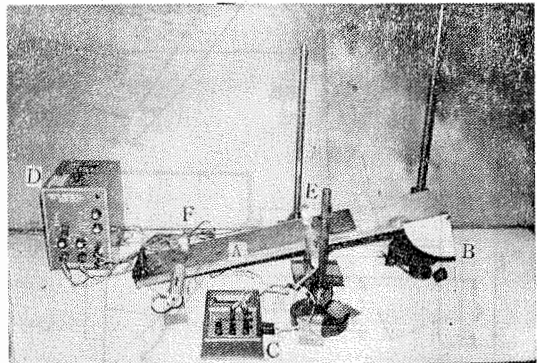


圖 7: 動摩擦係數實驗設備

註: A: 試驗板面 D: 光電管開關  
B:  $0^\circ-90^\circ$  刻度 E: 第一組光電管  
C: 計時器 F: 第二組光電管

詳見圖 8，傾斜板之傾斜角度可調節。若一遮光體通過第一組光電管時，計時器即自動開始計時，遮

光體通過第二組光電管時，計時器計時自動停止，計時器計時範圍為 99.99 秒，精度 0.01 秒。

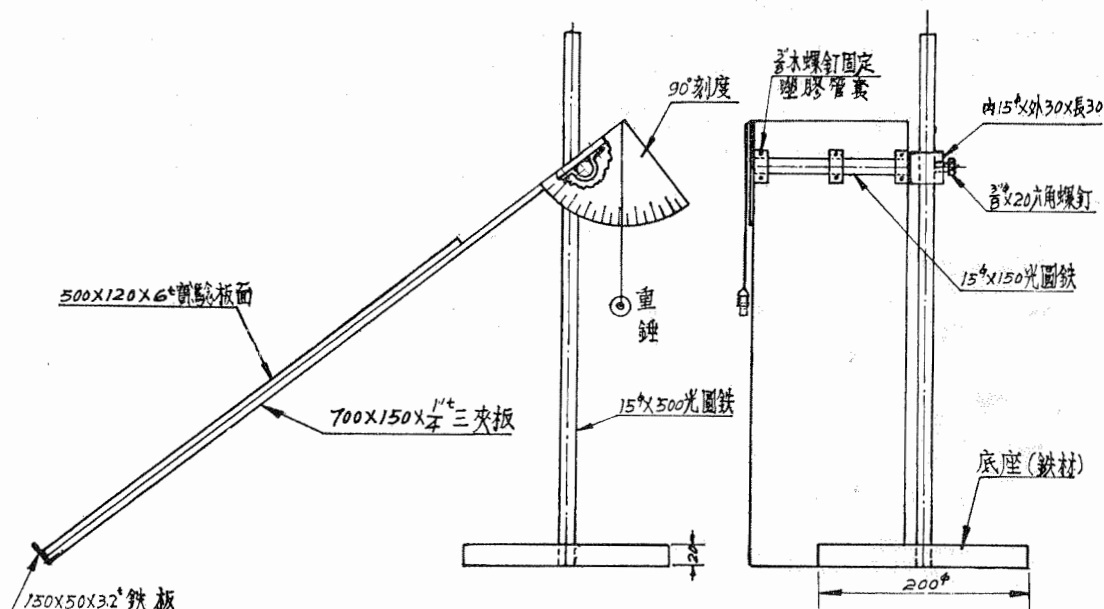


圖 8：動摩擦係數實驗之傾斜板

單位:mm. 比例:1:5

## 肆、實驗步驟

### (一) 稻穀含水率

秤取在來稻、蓬萊稻及秈稻各 5 公斤，分別經水選除去輕殼，夾雜物、灰塵等，然後晒乾，挑去尚存之夾雜物、變色穀粒及米粒，同時摘除穀粒上殘留之芒梗。將精選後稻穀每一品種分為五份，每份重約 800 公克，取四份分四批置放於恆溫恆濕箱中，乾球溫度控制在 15°C，濕球溫度分別控制在 8, 11.5, 13.5, 14.5 °C，置放四天。含水率改變後之稻穀，裝入塑膠袋中，予以密封，放入 15°C 恆溫箱中儲存備用。第五份稻穀浸水 10 小時，然後取出拭去稻穀表面多餘水份，裝入塑膠袋中，置於 15°C 恆溫箱中至少四天。

稻穀含水率測定時，取 5 至 10 公克樣品，以粉碎機粉碎 20 秒，置於不銹鋼皿中，加蓋後用電動天平秤至 0.0001 公克精度，然後去蓋，置於 130 °C 熱風烤箱 2 小時，取出時加蓋，置於乾燥室中冷卻至室溫，再測定其重量。含水率計算公式如下：

$$\text{含水率, \%} = \frac{B - C}{B - A} \times 100 \%$$

其中 A = 不銹鋼皿全重，公克

B = 烘乾前（樣品重 + 皿重）全重，公克

C = 烘乾後（樣品重 + 皿重）全重，公克

本實驗採用濕基（Wet basis）計算所有樣品之含水率。

### (二) 板面處理

普通鋼板用平面磨床磨平，不銹鋼板用布輪高速磨光，利用 Mahr 公司 W 5DT Perthometer 及 R 100 T5 Perthograph，測定其粗糙度，普通鋼板最大粗糙度  $R_t = 400 \mu\text{m}$ ，中心線平均粗糙度  $R_a = 0.82 \mu\text{m}$ ，不銹鋼板  $R_t = 0.67 \mu\text{m}$ ， $R_a = 0.43 \mu\text{m}$ 。板面不使用時，表面塗以黃油，防止生銹或刮傷。水泥板的水泥與沙之比為 1:2，表面以金屬鏟刀抹平。

### (三) 靜摩擦係數測定

靜摩擦係數測定實驗，係在暗房中進行，室溫為 25° ± 1°C，相對濕度約 90 %。照相機鏡頭對準角度刻度，閃光燈以 110V 交流電充電。欲測之板面，平放在旋轉圓盤上之平台，金屬板面以四氯化碳擦拭乾淨，水泥板面則以乾布擦拭。

所使用之稻穀樣品如圖 9，鐵塊底面有 50×30 mm 膠紙，用以粘着一層稻穀，約 46 顆穀粒，整個樣品重約 46 公克。初步實驗研究樣品重量對靜摩擦係數之影響。稻穀樣品上面加不同荷重，整個重量分別為 46, 92 及 153 公克。取含水率 13.89% 之在來稻以及 SS 41 鋼板及水泥板進行初步實驗。實驗結果顯示樣品重量對靜摩擦係數無明顯之影響。採用 92 公克之稻穀樣品進行所有之實驗。



圖 9 稻穀樣品

用手依逆時針方向轉旋轉圓盤，拉起阻尼器，使板面傾斜角度減小。將備妥之樣品置放在板面上，距銅片約 5 mm (如圖 2)，穀層與板面直接接觸，此時鬆手，圓盤即開始依順時針方向自動旋轉。熄掉室內所有燈光，利用照相機 B 快門，打開鏡頭。平台逐漸傾斜，至某一角度，樣品開始下滑，瞬間撞擊銅片，使二銅片接觸，閃光燈閃亮，軟片暴光，然後關閉鏡頭，開啓室內燈光，重新準備下一次實驗。相同條件之實驗重覆二十次，但每次實驗之稻穀全部換新。沖洗照畢之軟片，記錄照片中角度讀數，計算正切值，即為靜摩擦係數。每次實驗操作時間不超過一分鐘。

#### 四、動摩擦係數測定

將欲測之板面置放在傾斜板上，板面以四氯化碳擦拭乾淨。調節傾斜板角度  $\theta$ ，兩組光電管距離

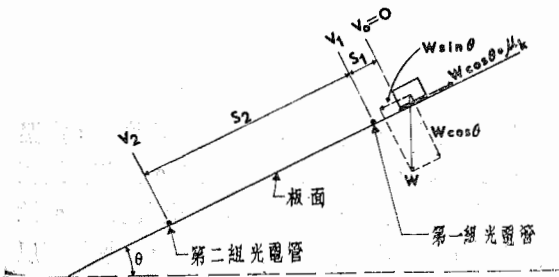


圖 10: 動摩擦係數測定原理圖

為  $S_2$ ，稻穀樣品下滑起點距第一組光電管距離為  $S_1$ ，如圖 10 所示。稻穀樣品準備方法與靜摩擦係數實驗相同。樣品開始下滑，經第一組光電管時，計時器自動開始計時，經第二組光電管時，計時器自動停止，記錄時間。

根據圖 10，可列出下列三式：

$$W \sin \theta - W \cos \theta \cdot \mu_k = \frac{W}{g} \cdot a \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$S_2 = V_1 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$V_1^2 = 2a S_1 \quad \dots \dots \dots (3)$$

- 其中  $W$  = 稻穀樣品全重，公克
- $\theta$  = 板面與水平夾角，度
- $\mu_k$  = 動摩擦係數
- $g$  = 重力加速度，9.8m/sec<sup>2</sup>.
- $a$  = 樣品下滑加速度，m/sec<sup>2</sup>.
- $S_1$  = 樣品下滑起始點與第一組光電管距離，m
- $S_2$  = 兩組光電管間距離，m
- $V_1$  = 樣品通過第一組光電管時的速度，m/sec.
- $t$  = 樣品自第一組光電管下滑至第二組光電管所費時間，sec.

解(1)至(3)式，得

$$\mu_k = \tan \theta - \frac{1}{g \cdot \cos \theta \cdot t^2} (4S_1 + 2S_2 - 4\sqrt{S_1(S_1 + S_2)}) \quad \dots \dots \dots (4)$$

本實驗中  $S_1 = 0.05m$

$S_2 = 0.30m$

普通鋼板面  $\theta = 15^\circ$ ，不銹鋼板面  $\theta = 14^\circ$

簡化(4)式得

$$\theta = 15^\circ \text{ 時, } \mu_k = 0.268 - \frac{0.0286}{t^2} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\theta = 14^\circ \text{ 時, } \mu_k = 0.249 - \frac{0.0285}{t^2} \quad \dots \dots \dots (6)$$

將實驗測得的秒數代入上述二式，即得動摩擦係數。

相同條件之實驗重覆二十次，每次實驗中稻穀全部更換。

### 伍、實驗結果與分析

#### (一) 稻穀含水率

稻穀樣品置放於恆溫恆濕箱中四天及浸水 10 小時後四天之含水率如下：

乾球溫度 °C	濕球溫度 °C	含水率 %		
		在來稻	蓬萊稻	秈 稻
15 °C	8,0	10,65	10,75	10,39
	11,5	13,89	13,88	13,61
	13,5	16,12	16,00	16,12
	14,5	20,64	21,12	21,31
浸水後		26,52	26,47	26,40

因三種稻穀尚未與控制下環境條件達成平衡，實驗結果無法推測三種品種間平衡含水率之差異。

### (二) 靜摩擦係數

靜摩擦係數測定實驗所拍攝照片如圖 11。各種條件下靜摩擦係數測定結果列於表 1。從表上可以看出稻穀在三種板面上之靜摩擦係數以水泥板最高，普通鋼板次之，不銹鋼板最小。低含水率時，鋼板及不銹鋼板面之靜摩擦係數並無顯著變化，但含水率在 16 % 以上時，靜摩擦係數隨含水率增高而略增。在水泥板面上，品種之影響顯著，在來稻之靜摩擦係數高於蓬萊稻及秈稻。

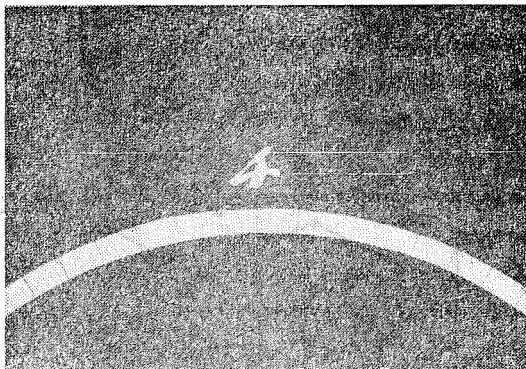


圖 11. 靜摩擦係數實驗拍攝之照片

註：代碼 4 為品種：在來稻  
含水率：13,89 %  
板 面：水泥板

表 1. 靜摩擦係數實驗值

品 種	稻穀含水率 %	靜摩擦係數		
		鋼 板	不銹鋼板	水泥板
在來稻	10,65	0,188	0,163	0,784
	13,89	0,191	0,166	0,822
	16,12	0,191	0,165	0,809
	20,64	0,205	0,178	0,785
	26,52	0,233	0,198	0,815

蓬萊稻	10,75	0,188	0,159	0,708
	13,88	0,188	0,159	0,650
	16,00	0,183	0,169	0,720
	21,12	0,208	0,178	0,705
	26,47	0,210	0,182	0,707
秈 稻	10,39	0,184	0,159	0,700
	13,61	0,182	0,158	0,743
	16,12	0,178	0,160	0,722
	21,31	0,212	0,172	0,690
	26,40	0,204	0,178	0,761

註：各數值皆為重複實驗 20 次之算術平均值。

各樣本間之靜摩擦係數實測值變異很大，最高及最低值列於表 2。

表 2. 靜摩擦係數實驗最高值與最低值

板 面 種 類	在來稻		蓬萊稻		秈 稻	
	最高	最低	最高	最低	最高	最低
鋼 板	0,259	0,155	0,246	0,149	0,238	0,149
不銹鋼板	0,233	0,123	0,236	0,132	0,216	0,132
水 泥 板	1,054	0,649	0,863	0,550	0,966	0,568

註：含水率範圍為 10,39 至 26,52 %

### (三) 動摩擦係數實驗

各種條件下動摩擦係數測定結果列於表 3。從表上可以看出稻穀在鋼板面上之動摩擦係數均高於不銹鋼板面。低含水率時，鋼板及不銹鋼板面上之動摩擦係數無明顯的變化，但含水率在 16 % 以上時，動摩擦係數隨含水率增高而略增。品種間之差異不顯著。

表 3. 動摩擦係數實驗值

品 種	稻穀含水率 %	動 摩 擦 係 數	
		鋼 板	不銹鋼板
在來稻	10,65	0,175	0,162
	13,89	0,175	0,159
	16,12	0,181	0,160
	20,64	0,202	0,178
	26,52	0,217	0,185
蓬萊稻	10,75	0,179	0,157
	13,88	0,176	0,155
	16,00	0,176	0,166
	21,12	0,195	0,180
	26,47	0,203	0,183
秈 稻	10,39	0,176	0,155
	13,61	0,176	0,154
	16,12	0,182	0,163
	21,31	0,192	0,166
	26,40	0,201	0,180

註：各數值皆為重複實驗 20 次之算術平均值。



各樣本間之動摩擦係數實驗值變異很大，最高與最低值列於表 4。

表 4. 動摩擦係數實驗最高值與最低值

板面種類	在來稻		蓬萊稻		秈稻	
	最高	最低	最高	最低	最高	最低
鋼板	0.240	0.144	0.217	0.149	0.224	0.144
不銹鋼板	0.209	0.125	0.209	0.130	0.210	0.130

註：含水率範圍為 10.36 至 26.52 %。

## 陸、討 論

變異數分析用來決定何者為影響實驗結果之重要因子。在各項實驗中獨立變異數分別為(1)品種，(2)板面，及(3)稻穀含水率。

### (一)靜摩擦係數實驗

#### 1. 板面的影響

板面類別對靜摩擦係數影響最大，如圖 12，13，14。圖中各點代表相同條件下重覆實驗 20 次之算術平均值。各線間垂直距離表示不同板面靜摩擦係數之差異。由圖可知三種稻穀在水泥板面上之靜摩擦係數皆高於鋼板及不銹鋼板甚多。此因水泥板表面非常粗糙，與稻穀表面產生互鎖作用，致使摩擦力較大。鋼板及不銹鋼板面較光滑，互鎖作用

不顯著。而不銹鋼板面之靜摩擦係數比鋼板稍低，此因不銹鋼板係經過磨光處理，表面極為光滑，摩擦力亦小。

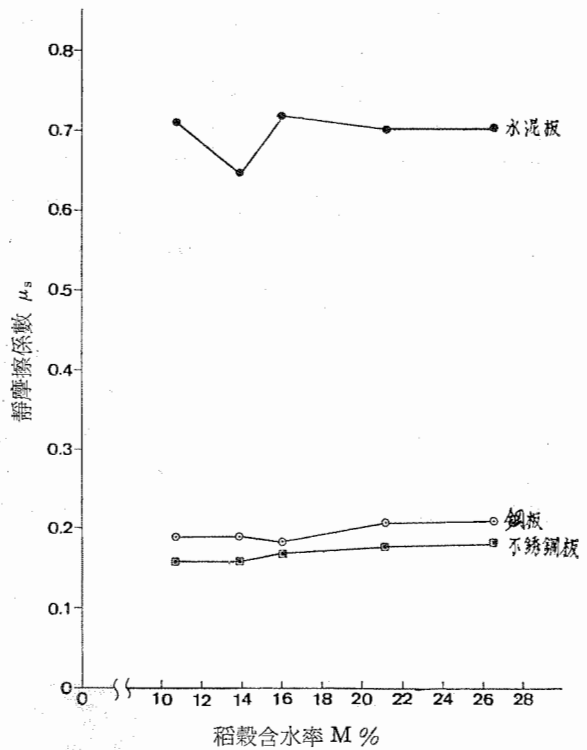


圖 13: 蓬萊稻在不同板面上之靜摩擦係數

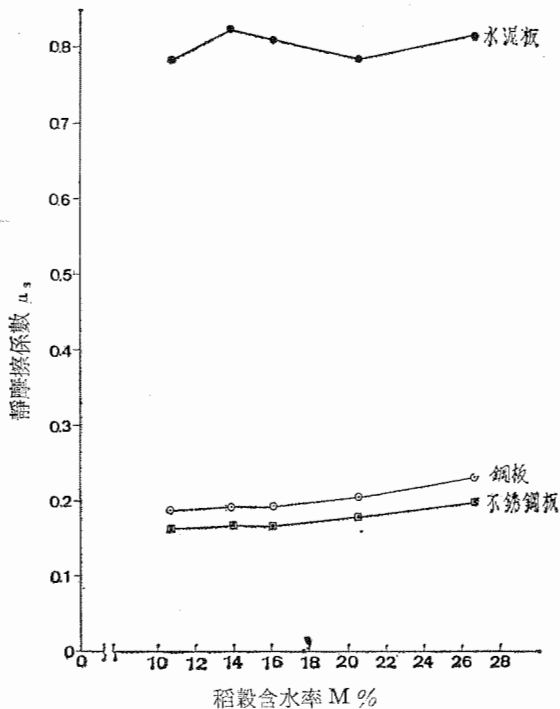


圖 12: 在來稻在不同板面上之靜摩擦係數

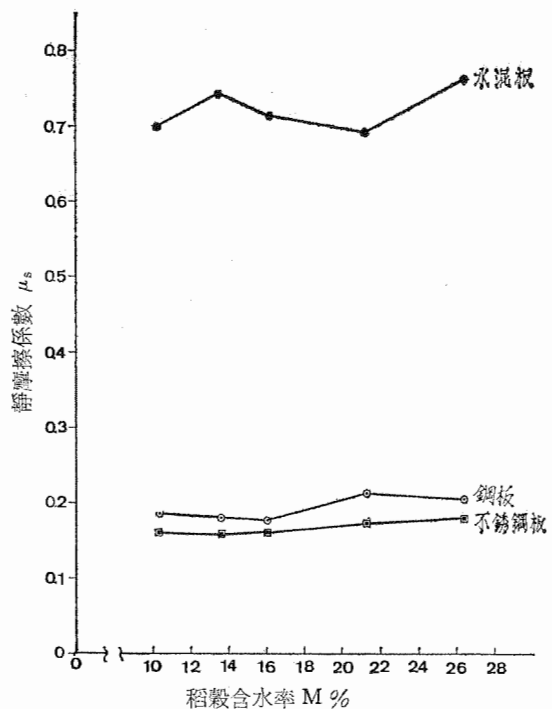


圖 14: 秈稻在不同板面上之靜摩擦係數

## 2. 品種的影響

在鋼板面上，品種對靜摩擦係數有些微影響，但無一定關係可循。在不銹鋼板面上，品種對靜摩擦係數之影響不顯著。但在水泥板面上，品種影響則很大，如圖 15。在來稻之靜摩擦係數比其他二品種高，而蓬萊稻及秈稻間之差異較小。取實驗所用稻穀與田間新鮮稻穀，置於放大 28 倍顯微鏡下觀察，發現本實驗所用之三種稻穀表面殘留的毛較其他稻穀稀少，尤其是蓬萊及秈稻受害更厲害，毛已幾近完全脫落，而在來稻尚存一些，此因稻穀經過各種處理過程損傷所致。由於在來稻表面尚存的毛較多，與水泥板面之互鎖作用較強，摩擦力因而較大。因鋼板及不銹鋼板面較光滑，互鎖作用不是摩擦力之主因，故稻穀表面毛多寡對靜摩擦係數之影響不如水泥板顯著。

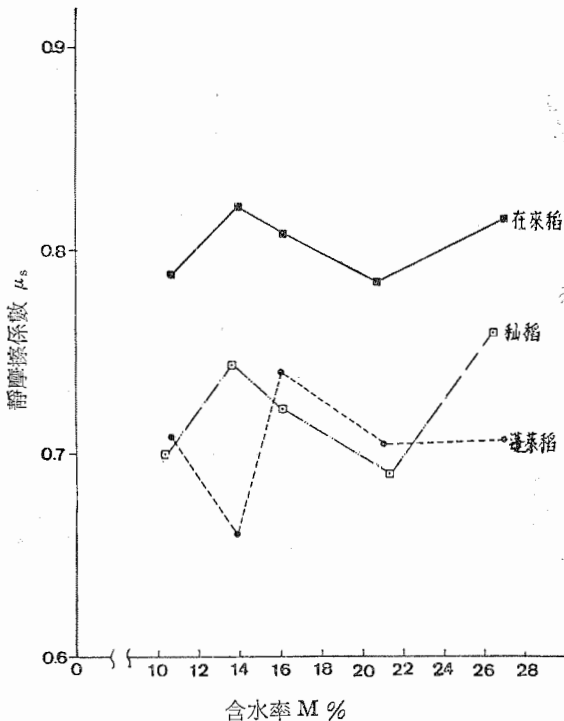


圖 15: 不同品種稻穀在水泥板面上之靜摩擦係數

## 3. 含水率的影響

在鋼板及不銹鋼板面上，含水率對靜摩擦係數影響甚為顯著。由於水份增加，稻穀胚乳部分軟化，抗壓強度因而減小。故在相同荷重下，高含水率稻穀與板面實際接觸面積比低含水率稻穀大，摩擦力因此增加。

各條件下靜摩擦係數之算術平均值用於計算含水率與靜摩擦係數的關係。直線迴歸模式用於建立

方程式來預測靜摩擦係數，對靜摩擦係數  $\mu_s$  與稻穀含水率  $M$  (%)，(濕基) 之迴歸方程式如下：

### (1) 鋼板面

$$\text{在來稻 } \mu_s = 0.1510877 + 0.0028759M$$

$$\gamma = 0.948$$

$$\text{蓬萊稻 } \mu_s = 0.1643237 + 0.0017613M$$

$$\gamma = 0.868$$

$$\text{秈稻 } \mu_s = 0.1595363 + 0.0018481M$$

$$\gamma = 0.781$$

### (2) 不銹鋼板面

$$\text{在來稻 } \mu_s = 0.1312241 + 0.0023785M$$

$$\gamma = 0.951$$

$$\text{蓬萊稻 } \mu_s = 0.1405309 + 0.0016362M$$

$$\gamma = 0.959$$

$$\text{秈稻 } \mu_s = 0.1415472 + 0.0013579M$$

$$\gamma = 0.953$$

從迴歸方程式計算的靜摩擦係數與實驗值作一比較，顯示二者之間差異不大(見表 5)。圖 16, 17, 18 表示鋼板及不銹鋼板的稻穀靜摩擦係數迴歸直線。

表 5. 稻穀靜摩擦係數實驗值與預測值之比較

品 種	含水率%	銅 板		不 銹 鋼 板	
		實驗值	預測值	實驗值	預測值
在來稻	10.65	0.188	0.182	0.163	0.157
	13.89	0.191	0.191	0.166	0.164
	16.12	0.191	0.197	0.165	0.170
	20.64	0.205	0.210	0.178	0.180
	26.52	0.233	0.227	0.198	0.194
蓬萊稻	10.75	0.188	0.183	0.159	0.158
	13.88	0.188	0.189	0.159	0.163
	16.00	0.183	0.193	0.169	0.168
	21.12	0.208	0.202	0.178	0.175
	26.47	0.210	0.211	0.182	0.184
秈 稻	10.39	0.184	0.179	0.159	0.155
	13.61	0.182	0.185	0.158	0.160
	16.12	0.178	0.189	0.160	0.163
	21.31	0.212	0.199	0.172	0.170
	26.40	0.204	0.208	0.178	0.177

含水率對水泥板面上之靜摩擦係數影響不顯著，此因板面與稻穀外表間互鎖作用為摩擦力產生之主因，雖然含水率增高，稻穀抗壓強度減弱，實際接觸面積增加，但對摩擦力之影響不顯著。

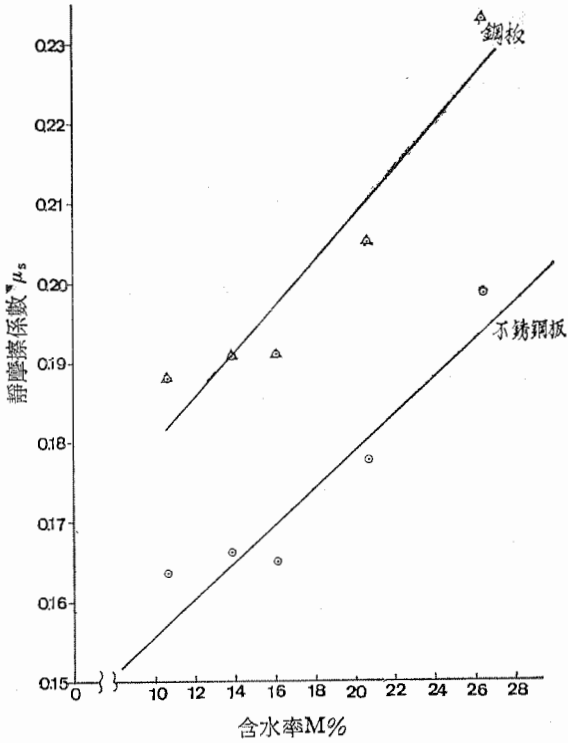


圖 16: 在來稻靜摩擦係數迴歸直線

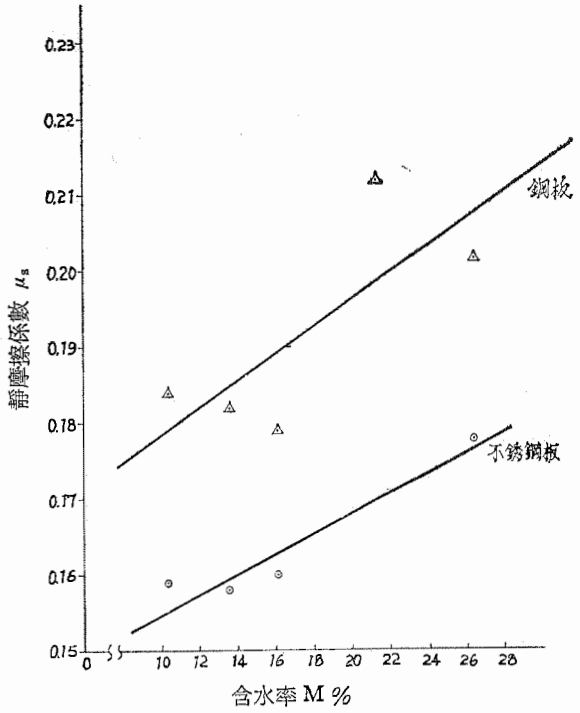


圖 18: 秈稻靜摩擦係數迴歸直線

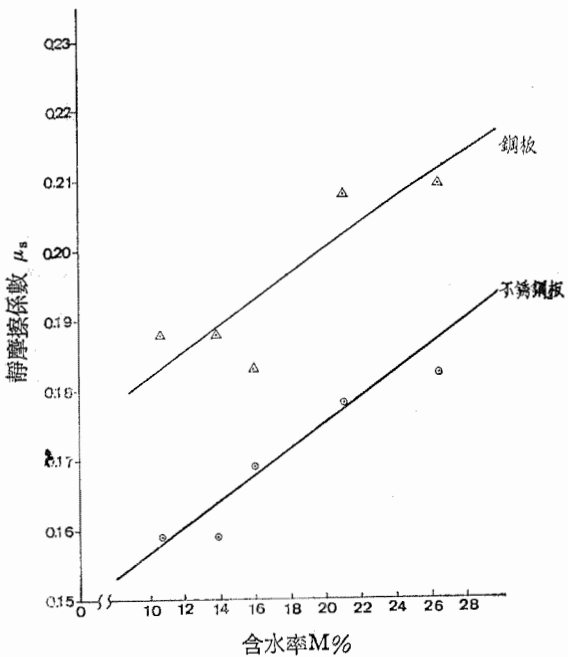


圖 17: 蓬萊稻靜摩擦係數迴歸直線

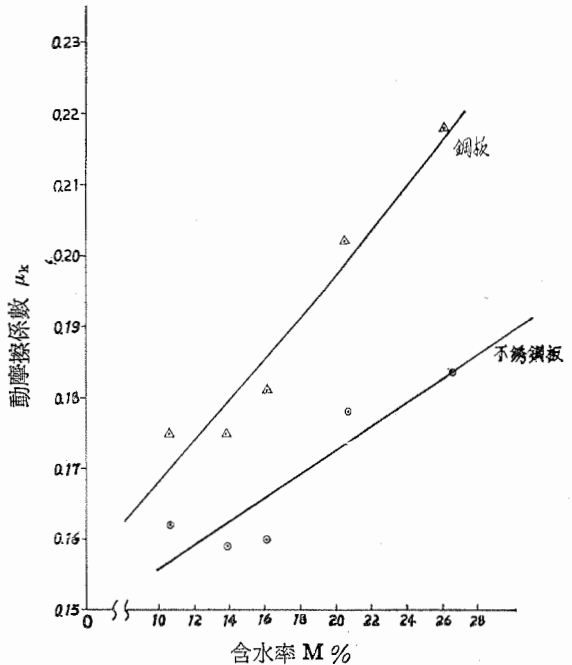


圖 19: 在來稻動摩擦係數迴歸直線

## (二) 動摩擦係數實驗

### 1. 板面的影響

三種稻穀在鋼板面上之動摩擦係數皆比不銹鋼板面高，(如圖 19, 20, 21)。因不銹鋼板面係經過

磨光處理，比鋼板光滑所致。

### 2. 含水率的影響

在鋼板及不銹鋼板面上，含水率對稻穀動摩擦係數皆有顯著影響。因稻穀強度隨含水率增加而減

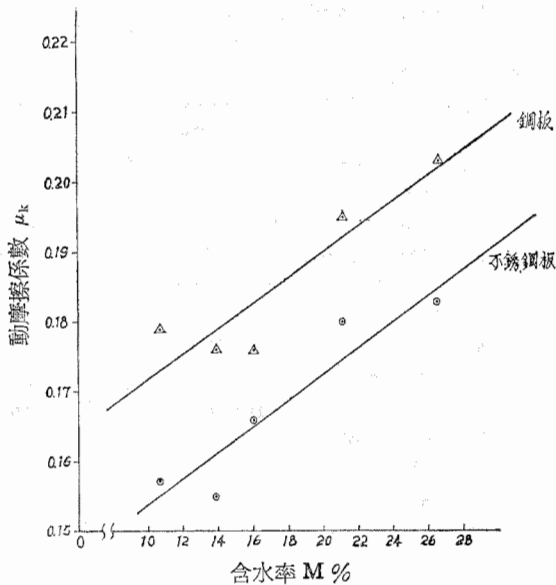


圖 20: 蓬萊稻動摩擦係數迴歸直線

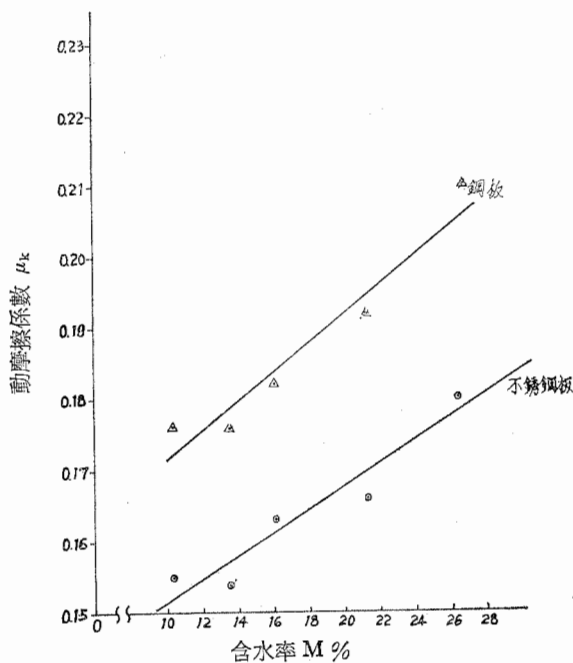


圖 21: 秈稻動摩擦係數迴歸直線

弱，實際接觸面積隨之增加，摩擦阻力因而增加。

各條件下動摩擦係數之算術平均值用於計算含水率與動摩擦係數之關係。直線迴歸模式用於建立方程式來預測動摩擦係數。對動摩擦係數  $\mu_k$  與稻穀含水率  $M$  (%)，(濕基) 之迴歸方程式如下：

(1) 鋼板面

$$\text{在來稻 } \mu_k = 0.1383004 + 0.0029435M$$

$$\gamma = 0.972$$

$$\text{蓬萊稻 } \mu_k = 0.153381 + 0.0018374M$$

$$\gamma = 0.918$$

$$\text{秈稻 } \mu_k = 0.1489114 + 0.0021797M$$

$$\gamma = 0.996$$

(2) 不銹鋼板面

$$\text{在來稻 } \mu_k = 0.137919 + 0.0017582M$$

$$\gamma = 0.914$$

$$\text{蓬萊稻 } \mu_k = 0.1336672 + 0.0019572M$$

$$\gamma = 0.945$$

$$\text{秈稻 } \mu_k = 0.1358932 + 0.0015773M$$

$$\gamma = 0.954$$

從迴歸方程式計算之動摩擦係數與實驗值作一比較，顯示二者之間差異不大（見表 6）。動摩擦係數之迴歸直線如圖 19，20，21 所示。

表 6. 稻穀動摩擦係數實驗值與預測值之比較

品 種	含水率%	鋼 板		不 銹 鋼 板	
		實驗值	預測值	實驗值	預測值
在來稻	10,65	0,175	0,170	0,162	0,157
	13,89	0,175	0,179	0,159	0,162
	16,12	0,181	0,186	0,160	0,166
	20,64	0,202	0,199	0,178	0,174
	26,52	0,217	0,216	0,185	0,185
蓬萊稻	10,75	0,179	0,173	0,157	0,155
	13,88	0,176	0,179	0,155	0,161
	16,00	0,176	0,183	0,166	0,165
	21,12	0,195	0,192	0,180	0,175
	26,47	0,203	0,202	0,183	0,185
秈 稻	10,39	0,176	0,172	0,155	0,152
	13,61	0,176	0,179	0,154	0,157
	16,12	0,182	0,184	0,163	0,161
	21,31	0,192	0,195	0,166	0,170
	26,40	0,210	0,206	0,180	0,178

## 柒、結 論

從實驗結果，可以得到以下結論：

1. 本實驗使用之板面中，稻穀在水泥板面上的靜摩擦係數最高，其次為鋼板，不銹鋼板最小。稻穀在鋼板面上的動摩擦係數比不銹鋼板面稍大。

2. 稻穀品種對鋼板及不銹鋼板面上之靜摩擦係數和動摩擦係數無明顯之影響。含水率之影響則甚為顯著，摩擦係數隨含水率增高而略增。

3. 在粗糙的水泥板面上，含水率對靜摩擦係數

沒有影響。就本實驗的三種稻穀而言，在來稻的靜摩擦係數高於蓬萊稻及秈稻。

4. 鋼板面上之靜摩擦係數與動摩擦係數之間的差值比不銹鋼板面之差值大。

### 捌、對今後研究工作的建議

對今後稻穀摩擦係數的研究作以下的建議：

1. 研究多層稻穀在不同板面上的摩擦係數，以與本實驗採用的單層稻穀實驗結果作一比較。

2. 研究外表未受損的稻穀在各種板面上的摩擦性質。

### 玖、參考文獻

1. Agricultural Engineering Yearbook, 1977. ASAE Data. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan.
2. Bickert, W. G. and F. H. Buelow, 1966. Kinetic Friction of Grains on Surfaces. Trans. of the ASAE 9(1):129-134
3. Brubaker, J. E. and J. Pos. 1965. Determining Static Coefficient of Friction of Grains on Structural Surfaces. Trans. of the ASAE 8(1):53
4. Clark, P. L., G. B. Welch, and W. R. Fox. 1970. Kinetic Friction of Cotton Seeds as Affected by Several Factors.
5. Higdon, A. and Stiles, W. B. 1962. Engineering Mechanics. P. 206-208.
6. Hoki, OM., M. Ichikawa, K. Tomita and K. Ban. 1976. Measurements of Static and Kinetic Coefficient of Friction of Grain. ASAE Paper No. 76-3033, Soc. Agr. Engrs., St. Joseph, Michigan.
7. Kramer, H. A. 1944. Factor Influencing the Design of Bulk Storage Bins for Rough Rice. Agricultural Engineering 25:463
8. Mohsenin, N. N. 1970. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Vol. 1.
9. Potter, J. H. 1967. Handbook of Engineering Sciences Vol. 1. The Applied Sciences. P. 866-867.
10. Skinner R. 1969. Mechanics, Blaisdell Publishing Company. Waltham, Mass. P. 190-196.
11. Snyder, L. H., W. L. Roller, and G. E. Hall. 1967. Coefficients of Kinetic Friction of Wheat on Various Metal Surfaces. Trans. of the ASAE 10(3):411-413,419.
12. Stewart, B. R., Q. A. Hossain, and O. R. Kunze, 1969. Friction Coefficients of Sorghum Grain on Steel, Teflon and Concrete Surfaces. Trans. of the ASAE 12:415-418.



# 佑聲企業股份有限公司

## 業務項目

水泥分散劑，固泥精，急結劑早強劑，養護劑，防水劑不收縮灌漿料，耐磨料脫模劑，填縫劑，及其他特殊建材。

公司地址：臺北市忠孝東路三段251巷4弄4-3號

電話號碼：(02) 721-4812, (02) 721-4813