

# 循環式乾燥機稻穀乾燥之模擬分析

## Simulation of Rice Drying in an Automatic Circulation Dryer

淡江大學機械工程系講師

張 經 正

Ching-chen Chang

### Abstract

To use computer simulation method in an automatic circulation rice dryer can analyze the distribution of temperature and humidity of the hot air as well as variation of moisture content and temperature of the rice in the drying process.

The results obtained from the study reveal that: applying computer simulation to the design of automatic circulation rice dryer can not only analyze and predict its performance, but also prevent the use of unnecessary fuel, reduce the operation cost of the drying machine. Thus, this method is worthy of further development.

### 一、前 言

本省稻穀之乾燥，傳統上均以日晒法為主。但最近幾年來，由於農村人力之缺乏與老化且因傳統日晒法有乾燥不均、胴裂率高、品質低劣及雨天不能乾燥等缺點，故已有逐漸完全改用乾燥機之趨勢。國內現有之各型乾燥機中，又以循環式乾燥機最為方便；因省時又省力，故廣為農民所使用。但本省目前從事生產稻穀循環式乾燥機之製造廠商雖已有十餘家，至今却仍無一套適當之電腦模擬程式可供分析並預測其性能之用。國外雖已有許多有關玉米乾燥機電腦模擬分析的研究，但無法適應本省稻穀乾燥機之需要。因此，本文之目的即為尋求建立一套稻穀循環式乾燥機之電腦模擬程式，以分析乾燥過程中熱空氣之溫度與濕度，稻穀之溫度與含水率之變化；並預測各種乾燥參數變化時對其乾燥效率之影響。期盼能提供日後各乾燥機之製造廠商研究發展之用，並進而達到降低乾燥機利用成本之目的。

### 二、理論分析

(一) 穀類乾燥基本理論之分析：

乾燥為熱量傳遞與水分傳遞同時進行的一種交換過程。在此過程中所需之熱量主要是用於蒸發穀粒內部之水分。因大部份具有生機性的農產品，在一定的外界條件下進行乾燥試驗時，其最初之乾燥期間，水分的排除均具有恒定之速率，故可稱為恆率乾燥期 (constant-rate drying period)。在恆率乾燥期過後，水分排除率降低，則稱為減率乾燥期 (falling-rate drying period)。茲分別敘述如下：

#### 1. 恆率乾燥期：

在此期間，穀物表面水分不斷地蒸發，乾燥空氣所供給之熱量全被用作蒸發水份之用，而穀體內部水份又立即擴散至表面，且其擴散速率大而足以補充被蒸發之部分。因此，穀體表面始終保持潤濕狀態且其表面之溫度亦即空氣濕球溫度；而根據濕球溫度計分析的理論，可得下式：

$$\begin{aligned} dM/dt &= f_v A (p_s - p_a) \\ &= \frac{h_c A (T_a - T_s)}{h_{r,s}} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

其中：dM/dt = 乾燥速率(kg/hr)

f\_v = 質量傳遞係數(1/hr)

- $A$  = 穀物與乾燥空氣之接觸面積 ( $m^2$ )
- $p_s$  = 在  $T_s$  溫度時，穀物表面之飽和水蒸氣壓 ( $mm\ Hg$ )
- $p_a$  = 空氣中水蒸氣的分壓 ( $mm\ Hg$ )
- $h_c$  = 對流熱傳係數 ( $kcal/m^2 \cdot ^\circ C \cdot hr$ )
- $T_a$  = 空氣溫度 ( $^\circ C$ )
- $T_s$  = 穀物表面溫度 (此時，即空氣之濕球溫度  $T_w$ ) ( $^\circ C$ )
- $h_{fg}$  = 在  $T_s$  溫度時，水之蒸發潛熱 ( $kcal/kg$ )

此恒率乾燥期將繼續進行直到自由水分從表面完全消失；且水分移去之速率亦將逐漸減慢直到穀物之臨界含水量 (critical moisture content) 為止。

### 2. 減率乾燥期：

當乾燥進行到含水量減少至臨界含水量時，穀物表面之水膜消失，表面即開始呈現乾燥現象，水分由穀物內部擴散至表面的速度已不足以供給表面水分的蒸發。因此，熱氣所供給的熱量，除蒸發水分外還會加熱穀體，使穀體表面溫度升高，且高於熱空氣之濕球溫度，又乾燥速率亦逐漸降低，使穀物表面變得更缺乏水分，直至表面脫離被水飽和之狀態為止。此為第一段減率乾燥期。第二段減率乾燥期是穀物內部之水分往低含水率之表面擴散，且發生蒸發作用，含水率繼續降低，直到穀物之平衡含水率 (equilibrium moisture content) 為止。

### 3. 乾燥方程式之推導：

在已過的穀物乾燥研究中，曾有許多不同的物理現象，被用來解釋穀體內部毛細孔組織中水分的轉移現象，這些現象為：

- (1) 液體之流動是由於表面張力的結果——毛細管流 (capillary flow)
  - (2) 液體之流動是由於水分濃度差異的結果——液體擴散作用 (liquid diffusion)
  - (3) 液體之流動是由於水分在管面擴散的結果——表面擴散 (surface diffusion)
  - (4) 蒸氣之移動是由於水分濃度差異的結果——水蒸氣擴散作用 (vapor diffusion)
  - (5) 蒸氣之移動是由於溫度差異的結果——熱擴散 (thermal diffusion)
  - (6) 水與水蒸氣之移動是由於有總壓力差存在的結果——液體動力流 (hydrodynamic flow)
- 蘇聯學者 Luikov (9) 曾根據上述之各項物理

現象發展成一套數學模式，以說明毛細管多孔組織體之乾燥情形。此數學模式可以偏微分方程式，表示於下：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = K_{11} \nabla^2 \theta + K_{12} \nabla^2 M + K_{13} \nabla^2 P \dots\dots (2-1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = K_{21} \nabla^2 \theta + K_{22} \nabla^2 M + K_{23} \nabla^2 P \dots\dots (2-2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = K_{31} \nabla^2 \theta + K_{32} \nabla^2 M + K_{33} \nabla^2 P \dots\dots (2-3)$$

其中： $K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$  為現象係數 (the phenomenological coefficient)  $K_{12}$ ,  $K_{13}$ ,  $K_{21}$ ,  $K_{23}$  及  $K_{31}$ ,  $K_{32}$  分別為各因素間之耦合係數 (the coupling coefficient)。

此耦合 (couple) 為乾燥時水分濃度、溫度與壓力梯度在對水分、能量與總質量傳遞所生之聯合效應而得的結果。由於壓力梯度所造成之水力流現象只有在超高之穀體溫度時才會出現，故在 Luikov 系統方程式中，總壓力之變化可略而不計。此即：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = K_{11} \nabla^2 \theta + K_{12} \nabla^2 M \dots\dots (3-1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = K_{21} \nabla^2 \theta + K_{22} \nabla^2 M \dots\dots (3-2)$$

又根據前人研究後之結論：皆認為在進行穀類乾燥之分析時，只有極少數之穀物需考慮溫度與水分間之耦合效應。故式(3)可再度合理地簡化如下：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = K_{11} \nabla^2 \theta \dots\dots (4-1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = K_{22} \nabla^2 M \dots\dots (4-2)$$

雖然式(4)已可明顯地說明穀類乾燥期間熱量傳遞與水分變化的情形，但事實上，在穀類乾燥之分析中，溫度梯度的變化可不予考慮。因此，若忽略溫度梯度之變化對穀物乾燥期間之影響，則式(4)可簡化為：

$$\frac{\partial M}{\partial t} = K_{22} \nabla^2 M \dots\dots (5)$$

其中  $K_{22}$  根據 Luikov(9) 之理論為穀物之熱擴散係數  $D$  (thermal diffusivity of a moist body)， $D$  值為常數，則式(5)可改寫如下：

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{C}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \dots\dots (6)$$

當穀物為平面對稱時， $C = 0$ ；為圓柱體時， $C = 1$ ；球形時， $C = 2$ 。又 Newman(10) 曾以各種不同的固體形狀模擬穀粒，以解上式，其所得之結果如下：

$$\frac{M - M_o}{M_o - M_o} = \frac{8}{\pi^2} (e^{-D\pi^2 t/4a^2} + \frac{1}{9} e^{-9D\pi^2 t/4a^2} + \frac{1}{25} e^{-25D\pi^2 t/4a^2} + \dots)$$

$$= \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2}{4} \pi^2 (Dt/a^2)\right] \dots \dots \dots (7)$$

此乃穀物為無限平面體時式(5)之解，其中 a 為平板之半厚度。M<sub>o</sub> 為穀物之初期含水率，M<sub>e</sub> 為穀物之平衡含水率。若為球體時，

$$\frac{M - M_o}{M_o - M_o} = \frac{6}{\pi^2} (e^{-D\pi^2 t/r^2} + \frac{1}{9} e^{-9D\pi^2 t/r^2} + \frac{1}{25} e^{-25D\pi^2 t/r^2} + \dots)$$

$$= \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp[-n^2 \pi^2 (Dt/r^2)] \dots \dots \dots (8)$$

其中 r 為球體之半徑長。若為磚塊體時，

$$\frac{M - M_o}{M_o - M_o} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2}{4} \pi^2 \left(\frac{Dt}{d^2}\right)\right] \dots \dots \dots (9)$$

其中：d<sup>2</sup> = 1 / (1/x<sup>2</sup> + 1/y<sup>2</sup> + 1/z<sup>2</sup>)

省略級數後幾項，則可得乾燥方程式如下：

$$\frac{M - M_o}{M_o - M_o} = MR = A_p e^{-k t} \dots \dots \dots (10)$$

其中：MR 為水分比 (moisture ratio)

A<sub>p</sub> 為視穀物形狀而定之常數，依式(7)~(9)分別為 8/π<sup>2</sup>，6/π<sup>2</sup> 及 (8/π<sup>2</sup>)<sup>3</sup>

K 為乾燥常數 (drying constant)，依式(7)~(9)分別為 Dπ<sup>2</sup>/4a<sup>2</sup>，Dπ<sup>2</sup>/r<sup>2</sup> 與 Dπ<sup>2</sup>/4d<sup>2</sup>

#### 4. 稻穀之擴散係數與乾燥常數：

日本學者村田敏(7)曾就上述之乾燥方程式做實驗以測定稻穀之 K 值與 D 值，其所得之結果如下：

$$K = 1.86 \times 10^4 e^{-\frac{3.29 \times 10^8}{T}} \dots \dots \dots (11)$$

其中：T 為乾燥溫度 (°K)

$$D = k \frac{\rho^2}{G \pi^2} \dots \dots \dots (12)$$

其中：D 為熱擴散係數

ℓ 為橢圓體之最小軸徑

G 為形狀指數 (geometry index)

$$= \frac{1}{4} + \frac{3}{8} A_o^2 + \frac{3}{8} B_o^2$$

又，A<sub>o</sub> = a/ℓ

B<sub>o</sub> = b/ℓ

a, b 分別為橢圓形穀粒(稻穀)之長軸與短軸。

若將試驗稻穀之各軸代入式(12)則可得：

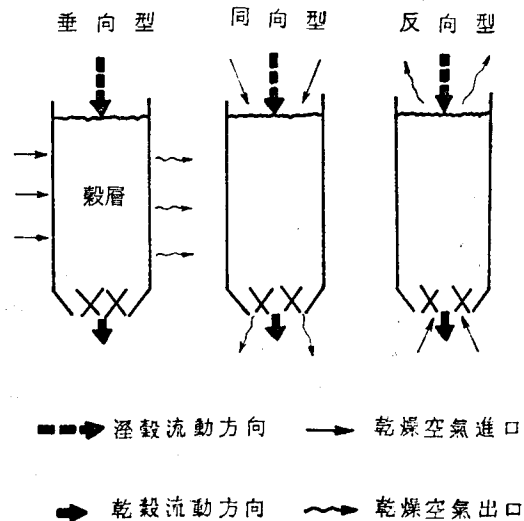
$$D = 5.19 \times 10^{-3} e^{-\frac{3.29 \times 10^8}{T}} \dots \dots \dots (13)$$

此乃稻穀之熱擴散係數與乾燥溫度之關係式。

故由式(11)及式(13)即可求得稻穀之 K 值，D 值。

#### (二) 循環式乾燥機之理論分析：

一般之穀物乾燥機可分為靜置式乾燥系統 (fixed-bed drying system) 與連續式乾燥系統 (continuous-flow drying system)，而連續式乾燥系統又可依穀物與熱空氣在乾燥機內流動之方向而加以分類為：(見圖一)



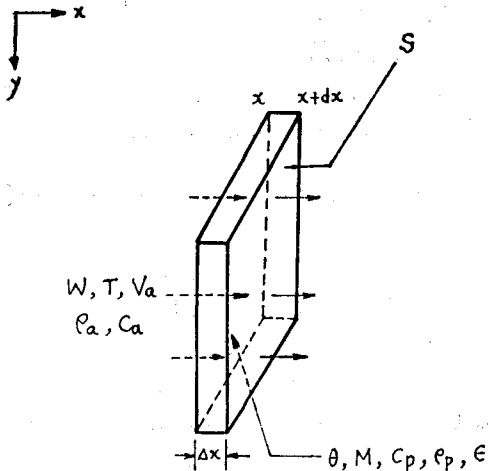
圖一、三種連續式乾燥機的說明

(1) 垂向型乾燥機 (crossflow dryer) —— 熱空氣之流向與穀物之流向互相垂直者。

(2) 同向型乾燥機 (concurrent flow dryer) —— 熱空氣之流向與穀物之流向相同者。

(3) 反向型乾燥機 (counterflow dryer) —— 熱空氣之流向與穀物之流向相反者。

由於循環式乾燥機之作用原理係熱空氣之流向與穀物之流向互相垂直，故屬於垂向型乾燥系統。又在此垂向型乾燥系統中，因熱空氣在 x 軸 (水平) 方向流動，穀物在 y 軸 (垂直) 方向流動，故可在此移動之穀層中任取一微小之體積 (見圖二) 以分析通過此微小體積之能量與質量之平衡狀態。其有關之基本假設為：



圖二、循環式乾燥機內移動穀層之微小體積

其中： $C_a, C_p$  分別為乾燥空氣及穀粒之定壓比熱  
 $\rho_a, \rho_p$  分別為空氣與穀物之密度  
 $T, \theta$  分別為空氣與穀物之溫度  
 $W$  為空氣之濕度， $V_a$  為空氣流速率  
 $M$  為穀物之含水率， $\epsilon$  為穀層之孔隙度

(1) 在乾燥過程中，穀物體積之縮小變化可略而不計。

(2) 在穀粒中，溫度之梯度變化可略而不計。

(3) 穀粒與穀粒間之熱傳導現象可以忽略。

(4) 氣流 (air flow) 與穀流 (grain flow) 均為正壓型 (plug-type)。

(5)  $\partial T/\partial t, \partial W/\partial t$  之量在與  $\partial T/\partial x, \partial W/\partial x$  比較時甚小，可略而不計。

(6) 乾燥箱之四壁均具絕熱性質 (adiabatic)，且其熱容量可略而不計。

(7) 濕空氣與穀物之熱容量在短時間內維持一定。

就圖二所取之微小體積的各項平衡而論，其中存有四項未知量待解，分別為：

$M$ ：穀體之水分含量 (the grain kernel moisture content)

$W$ ：空氣之濕度比 (the humidity ratio)

$T$ ：空氣溫度 (the air temperature)

$\theta$ ：穀體溫度 (the product temperature)

故需建立四種平衡狀態才能導出四條平衡方程式以解上述之四項未知數。分別討論於下：

1. 空氣熱焓值 (enthalpy) 之變化：

以對流方式傳遞給穀體之熱量應等於空氣進出此微小體積 ( $Sdx$ ) 所攜帶熱焓值之差再加上在氣隙內之空氣隨時間而產生之焓值變化量。

其中，

在  $dt$  時間內，經由  $x$  面通過  $S dx$  微小體積之空氣量  $= (\rho_a V_a + \rho_w V_w) S dx dt$

在  $dt$  時間內，空氣進入  $S dx$  所攜帶之焓值  $= (\rho_a V_a C_a + \rho_w V_w C_w) S T dt$

在  $dt$  時間內，空氣自  $S dx$  排出時所攜帶之焓值  $= (\rho_a V_a C_a + \rho_w V_w C_w) (T + \partial T/\partial x dx) S dx dt$

故在垂直方向上，空氣通過穀層時，其熱焓值之變化量為上二式之差：

$$\text{即：} (\rho_a V_a C_a + \rho_w V_w C_w) \partial T/\partial x dx S dx dt$$

又在氣隙內之空氣隨時間所產生之焓值變化量  $= (\rho_a C_a + \rho_w C_w) \epsilon S dx \partial T/\partial t dt$

其中， $\epsilon$  為穀層之孔隙度 (%)。

故在時間內，空氣顯熱 (sensible heat) 之總變化量為：(上二式之和)

$$(\rho_a C_a + \rho_w C_w) S dx (V_a \partial T/\partial x + \epsilon \partial T/\partial t) dt$$

由於空氣通過穀層時，對流熱交換作用隨即產生，而此作用將使空氣之顯熱發生變化，其變化量在時間內為：

$$h \cdot a \cdot (T - \theta) \cdot S \cdot dx \cdot dt$$

其中  $a$  為每單位微小體積之穀體表面積， $h$  為對流熱傳係數。

故根據能量平衡原理，可得以下之結果：

$$V_a \frac{\partial T}{\partial x} + \epsilon \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{-h \cdot a}{(\rho_a C_a + \rho_w C_w)} (T - \theta) \dots \dots \dots (14)$$

在上式中， $\epsilon \partial T/\partial t$  之量與  $V_a \partial T/\partial x$  比較下甚小，故可略而不計，上式可寫成：

$$V_a \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-h \cdot a}{\rho_a C_a + \rho_w C_w} (T - \theta) \dots \dots \dots (15)$$

又： $V_a \rho_a = G_a$  (空氣之流量率) 故式(15)為：

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-h \cdot a}{G_a C_a + G_w C_w} (T - \theta) \dots \dots \dots (16)$$

利用上式即可解出空氣之溫度  $T$ 。

2. 穀物熱焓值之變化：

經對流作用自空氣傳遞至穀體之能量應為加熱穀體所需之能量，與水分自穀體蒸發及加熱穀體內部已蒸發之水蒸氣的水蒸氣作用需焓值之總和。

其中，在任何時間  $t$  內，穀粒在  $S dx$  微小體積內所含之焓值  $= S dx (\rho_p C_p + \rho_w C_w M) \theta$

在時間  $t + dt$  後，其焓值變為：

$$S dx (\rho_p C_p + \rho_w C_w M) (\theta + \frac{\partial \theta}{\partial t} dt)$$

$\therefore dy = V_p dt$  ( $V_p$  為穀流速率)

∴上式可寫成： $S dx (\rho_p C_p + \rho_p C_w M)$   
 $(\theta + \frac{\partial \theta}{\partial t} \frac{dy}{V_p})$

二式之差即為加熱穀體所需之能量：

$$\text{即：} (\rho_p C_p + \rho_p C_w M) S dx \frac{\partial \theta}{\partial t} \frac{dy}{V_p} \dots (17)$$

又在 dt 時間內，水分蒸發量應等於通過 Sdx 微小體積時，空氣濕度比的變化量。

$$\text{此即：} G_a S \frac{\partial w}{\partial x} dx \frac{dy}{V_p}$$

故在 dt 時間內，水分蒸發所需之熱能為：

$$h_{r_g} G_a S \frac{\partial w}{\partial x} dx \frac{dy}{V_p} \dots (18)$$

又在 dt 時間內，將穀體內部已蒸發之水蒸氣自穀體溫度  $\theta$  加熱至空氣溫度 T 所需之熱能為：

$$C_v (T - \theta) G_a S \frac{\partial w}{\partial x} dx \frac{dy}{V_p} \dots (19)$$

因對流作用空氣中焓值所生之變化為：

$$ha S dx (T - \theta) dt$$

$$\text{或，} ha S dx (T - \theta) \frac{dy}{V_p} \dots (20)$$

(20) 根據上述之能量平衡原理，可得下式：

$$\text{式(17) + 式(18) + 式(19) = 式(20)}$$

即：

$$ha S dx (T - \theta) \frac{dy}{V_p} = [(\rho_p C_p + \rho_p C_w M)$$

$$S dx (\frac{\partial \theta}{\partial t} \frac{dy}{V_p} + h_{r_g} G_a S \frac{\partial w}{\partial x} dx \frac{dy}{V_p} + C_v (T - \theta) G_a S \frac{\partial w}{\partial x} dx \frac{dy}{V_p}] \dots (21)$$

左右二式可同消去  $S dx \frac{dy}{V_p}$ ，可得下式：

$$ha(T - \theta) = [(\rho_p C_p + \rho_p C_w M) \frac{\partial \theta}{\partial t} + h_{r_g} G_a \frac{\partial w}{\partial x} + C_v (T - \theta) G_a \frac{\partial w}{\partial x}] \dots (22)$$

$$\therefore \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{ha(T - \theta)}{\rho_p C_p + \rho_p C_w M} - \frac{h_{r_g} + C_v (T - \theta)}{\rho_p C_p + \rho_p C_w M}$$

$$G_a \frac{\partial w}{\partial x} \dots (23)$$

∴  $V_p \rho_p = G_p$  (穀物之流量率) 且  $dy = V_p dt$

$$\therefore \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{ha(T - \theta)}{G_p C_p + G_p C_w M} - \frac{h_{r_g} + C_v (T - \theta)}{G_p C_p + G_p C_w M}$$

$$G_a \frac{\partial w}{\partial x} \dots (24)$$

由此式即可求得穀體溫度  $\theta$  之值。

### 3. 空氣濕度之變化：

整個微量體積中穀粒所失却之水分等於進入此

微量體積前，空氣所攜帶之水蒸氣量與空氣排出時所攜帶量之差，再加上穀粒間隙中空氣濕度之變化量。

在 dt 時間內，通過 x 面與 x+dx 面之水蒸氣量分別為：

$$G_a S W dt \text{ 與 } G_a S (W + \frac{\partial w}{\partial x} dx) dt$$

故空氣濕度比對 x 之變化量為： $G_a S \frac{\partial w}{\partial x} dx dt$

∴  $dy = V_p dt$  ∴ 上式以 dy 表示則可寫成：

$$G_a S \frac{\partial w}{\partial x} dx \frac{dy}{V_p}$$

又在此微量體積內，穀粒間隙中空氣濕度比對時間之變化量為：

$$\epsilon S dx \rho_a \frac{\partial w}{\partial t} \frac{dy}{V_p}$$

在 dt 時間內，整個微量體積中穀粒所失却之水分量為：

$$\rho_p S dx \frac{\partial M}{\partial t} \frac{dy}{V_p}$$

故根據質量平衡原理，可得下式：

$$\rho_p S dx \frac{\partial M}{\partial t} \frac{dy}{V_p} = -G_a S \frac{\partial w}{\partial x} dx \frac{dy}{V_p} + \epsilon S dx \rho_a \frac{\partial w}{\partial t} \frac{dy}{V_p} \dots (25)$$

左右二式可同消去  $S dx \frac{dy}{V_p}$  則式(25)變成：

$$\rho_p \frac{\partial M}{\partial t} = -G_a \frac{\partial w}{\partial x} + \epsilon \rho_a \frac{\partial w}{\partial t} \dots (26)$$

若省略  $\epsilon \rho_a \frac{\partial w}{\partial t}$  一項，則可得：

$$\rho_p \frac{\partial M}{\partial t} = -G_a \frac{\partial w}{\partial x} \dots (27)$$

$$\therefore V_p \rho_p = G_p \text{ 且 } dy = V_p dt$$

$$\text{故式(27)變成：} \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{G_p}{G_a} \frac{\partial M}{\partial y} \dots (28)$$

由上式即可求得乾燥時空氣濕度比之變化情形

### 4. 穀體內部水分含量之變化：

由於所取之微小體積，可視作一薄層 (thin-layer)，故穀粒內部水分含量之變化乾燥方程式可用式(5)，表示如下：

$$\frac{\partial M}{\partial t} = K_{22} \nabla^2 M$$

或改寫式(10)如下：

$$M = A_p (M_o - M_e) e^{-k^2 t} + M_e \dots (29)$$

故由上式即可求得乾燥時穀粒內部各點水分含量變化的情形。

5. 界限條件 (boundary condition):

在分析任何穀物乾燥系統前，都必須知道該穀物之最初條件及界限條件，且還要知道乾燥空氣之有關資料，其項目包括：

- (1) 待乾穀物最初之溫度及其含水率。
- (2) 乾燥空氣進氣時之溫度及其絕對濕度。

亦即：

$$\begin{aligned} T(0, y) &= T_{1a} \\ \theta(x, 0) &= \theta_0 \\ W(0, y) &= W_{1a} \\ M(x, 0) &= M_0 \end{aligned}$$

三、數 值 解 法

一穩定狀態之垂向型乾燥機之系統微分方程組及其邊界條件條件已如前述。故可以有限差分 (the finite difference) 之技巧來解此系統微分方程組的解。

式(16)；若以前差分 (forward difference) 技巧運算，則可寫成下式：

$$\frac{T_{x+\Delta x, y+\Delta y} - T_{x, y+\Delta y}}{\Delta x} = \frac{-h \cdot a}{G_a C_a + G_a C_v W_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} - (T_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} - \theta_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y})} \dots (30)$$

因， $T_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} = \frac{T_{x+\Delta x, y+\Delta y} + T_{x, y+\Delta y}}{2}$  故代入式(30)，且重新整理，可得空氣之溫度方程式 (T-equation) 於下：

$$\begin{aligned} T_{x+\Delta x, y+\Delta y} &= [T_{x, y+\Delta y} (2G_a C_a + 2G_a C_v W_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} - ha\Delta x) + \theta_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} (2ha\Delta x)] / (2G_a C_a + 2G_a C_v W_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} + ha\Delta x) \dots (31) \end{aligned}$$

令 CON1 = 2G<sub>a</sub>C<sub>a</sub>

CON2 = 2G<sub>a</sub>C<sub>v</sub>

CON3 = haΔx

CON4 = ρ<sub>p</sub>C<sub>p</sub>

CON5 = ρ<sub>p</sub>C<sub>w</sub>

CON6 = 2haΔx

SCON1 =  $\frac{G_a \Delta x}{V_p \Delta x}$

SCON2 =  $\frac{G_p \Delta x}{G_a \Delta y}$

SCON3 =  $\frac{ha \Delta y}{V_p}$

故方程式(31)可寫成：

$$T_{x+\Delta x, y+\Delta y} = [T_{x, y+\Delta y} (CON1 + CON2 W_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} - CON3) + \theta_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} (CON4 + CON5 W_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} + CON6)] / (CON1 + CON2 W_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} + CON3) \dots (32)$$

又方程式(24)可寫成下式：

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} - \theta_{x+1/2\Delta x, y}}{\Delta y} &= \frac{ha}{\rho_p V_p C_p + \rho_p V_p C_w M_{x+1/2\Delta x, y}} \cdot (T_{x+1/2\Delta x, y} - \theta_{x+1/2\Delta x, y}) \\ &= \frac{h r_g + C_v (T_{x+1/2\Delta x, y} - \theta_{x+1/2\Delta x, y})}{\rho_p V_p C_p + \rho_p V_p C_w M_{x+1/2\Delta x, y}} \cdot G_a \cdot \frac{W_{x+\Delta x, y} - W_{x, y}}{\Delta x} \dots (33) \end{aligned}$$

若重排上式，則可得穀物之穀體溫度方程式 (θ-equation) 於下：

$$\begin{aligned} \theta_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} &= \theta_{x+1/2\Delta x, y} + \left\{ ha \frac{\Delta y}{V_p} \left( \frac{T_{x+\Delta x, y} + T_{x, y}}{2} - \theta_{x+1/2\Delta x, y} \right) - [h r_g + C_v \left( \frac{T_{x+\Delta x, y} + T_{x, y}}{2} - \theta_{x+1/2\Delta x, y} \right)] \right. \\ &\quad \left. G_a \frac{\Delta y}{V_p} \frac{W_{x+\Delta x, y} - W_{x, y}}{\Delta x} \right\} / (\rho_p C_p + \rho_p C_w M_{x+1/2\Delta x, y}) \dots (34) \end{aligned}$$

式(34)，若以SCON1, SCON2, SCON3代入，則可得：

$$\begin{aligned} \theta_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} &= \theta_{x+1/2\Delta x, y} + \{ SCON3 (TMTH) - (h r_g + C_v (TMTH)) SCON1 (W_{x+\Delta x, y} - W_{x, y}) \} / (CON4 + CON5 M_{x+1/2\Delta x, y}) \dots (35) \end{aligned}$$

其中：TMTH =  $\frac{T_{x+\Delta x, y} + T_{x, y}}{2} - \theta_{x+1/2\Delta x, y}$

至於式(28)則可寫成：

$$\frac{W_{x+\Delta x, y+\Delta y} - W_{x, y+\Delta y}}{\Delta x} = - \frac{G_p}{G_a} \cdot \frac{M_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} - M_{x+1/2\Delta x, y}}{\Delta y} \dots (36)$$

∴ SCON 2 =  $\frac{G_p \Delta x}{G_a \Delta y}$

故式(36)變成： $W_{x+\Delta x, y+\Delta y} = W_{x, y+\Delta y} - SCON2 (M_{x+1/2\Delta x, y+\Delta y} - M_{x+1/2\Delta x, y}) \dots (37)$

上式即為空氣之濕度比方程式 (W-equation)

穀物之含水率方程式 (M-equation) 則如式(29)：

即： $M = A_p (M_0 - M_e) e^{-kt} + M_e$

其中  $A_p$  及  $K$  值分別為穀物之形狀常數及乾燥常數，已於前述。至於稻穀之平衡含水率  $M_e$  (equilibrium moisture content) 可由 Henderson 方程式求之：

即：

$$1 - rh = eaTM_e^n \dots\dots\dots(38)$$

其中： $rh$  = 平衡相對濕度 (小數)

$T$  = 乾燥溫度 ( $^{\circ}K$ )

$a, n$  = 依穀物不同而相異之常數。

又稻穀之  $a$  值及  $n$  值已由日本學者吉崎繁(8)作實驗求出，分別為：

$$a = 2.32 \times 10^{-5}; n = 2$$

故  $M_e$  可由此而得，若將所得之  $M_e$  值，與  $A_p$  值， $K$  值再代入式(2)中，即可求得穀粒內部之含水率變化情形。

#### 四、結果與討論

利用前述乾燥系統中四項聯立方程式 (式 16, 24, 28, 29) 的解析過程作成電腦的運算程式，可模擬循環式乾燥機內稻穀的乾燥情形。若再將此乾燥模擬程式的分析結果，繪製成各種圖表，加以比較；則將可決定各種乾燥參數變化時，對其乾燥效率所產生的影響，並進而減低乾燥機之操作成本。其中：

圖三為初期含水率為35%之稻穀置於循環式乾燥機內，以風量率  $175 \text{ m}^3/\text{hr}$  及  $350 \text{ m}^3/\text{hr}$  通風乾燥時，所用不同之熱風溫度對其平均含水率的影響。

圖四為初期含水率為35%之稻穀置於循環式乾燥機內，以熱風溫度  $49^{\circ}C$  及  $60^{\circ}C$  加熱乾燥時，所用不同之風量率對其平均含水率的影響。

圖五為循環式乾燥機在熱風溫度  $49^{\circ}C$ ，風量率  $250 \text{ m}^3/\text{hr}$  及熱風溫度  $60^{\circ}C$ ，風量率  $350 \text{ m}^3/\text{hr}$  的操作下，不同之初期含水率對其乾燥速率的影響。

圖六為稻穀在循環式乾燥機內乾燥時，改變熱風溫度與改變風量率對其乾燥速率影響之比較。

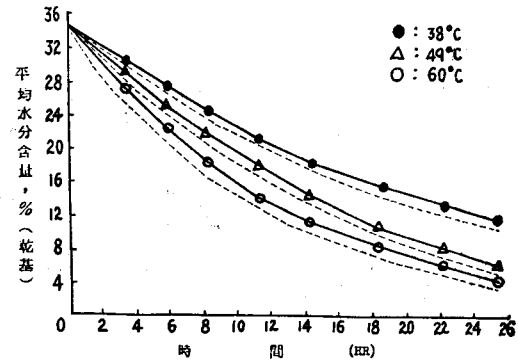
圖七為不同之初期含水率的稻穀在乾燥機內乾燥時，分別改變其熱風溫度與風量率，而對其乾燥效率的比較。

由以上這些圖，可將此電腦模擬乾燥機之結果歸納成以下幾點：

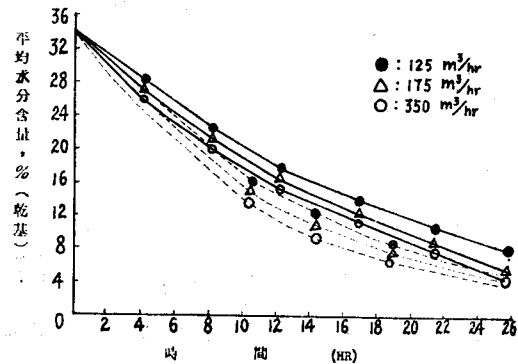
(1) 當熱風溫度升高時，乾燥機內稻穀乾燥之速

率也將相對地增加。其間之變化可見圖三。

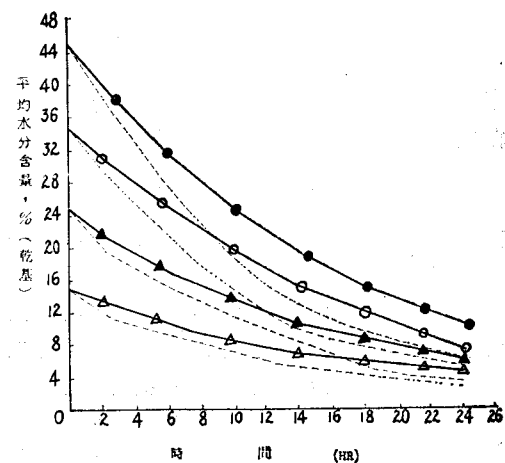
(2) 熱風溫度愈低，則稻穀乾燥之恆率乾燥期也愈長。(圖三)



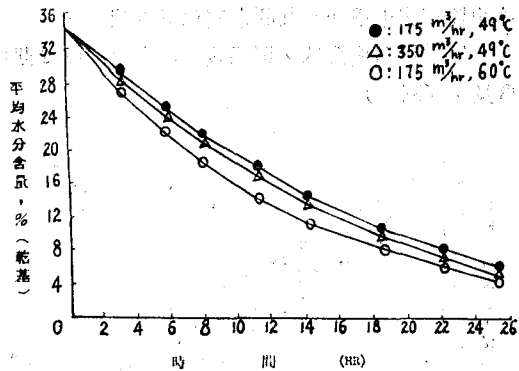
圖三、熱風溫度對循環式乾燥機稻穀乾燥之平均水分含量的影響 (實線 =  $175 \text{ m}^3/\text{hr}$ , 虛線 =  $350 \text{ m}^3/\text{hr}$ )



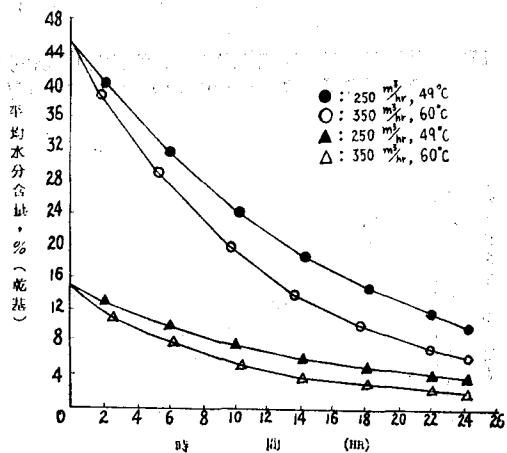
圖四、風量率對循環式乾燥機稻穀乾燥之平均水分含量的影響 (實線 =  $49^{\circ}C$ , 虛線 =  $60^{\circ}C$ )



圖五、初期含水率對循環式乾燥機稻穀乾燥之平均水分含量的影響 (實線 =  $49^{\circ}C$ ,  $250 \text{ m}^3/\text{hr}$ , 虛線 =  $60^{\circ}C$ ,  $350 \text{ m}^3/\text{hr}$ )



圖六、熱風溫度與風量率的改變，對循環式乾燥機稻穀乾燥影響之比較



圖七、熱風溫度與風量率的增加對不同之初期含水率的稻穀，其乾燥速率之比較

(3)當風量率增加時，乾燥機內稻穀乾燥之速率也隨之增加。其間之變化可見圖四。

(4)增高熱風溫度將較增高風量率可得較高之乾燥速率。(圖六)

(5)熱風溫度增高，風量率加大對初期含水率較高之稻穀的乾燥速率影響較大。(圖七)

## 五、結 論

由電腦模擬循環式乾燥機乾燥過程的結果，可以看出：

1.在乾燥初期含水率相同的稻穀時，增加熱風溫度將較增加風量率可得較高之乾燥速率。故日後在乾燥機之設計上，欲使乾燥效率提高，則其重點應為熱風溫度的增高而非風量率的加大。

2.在乾燥初期含水率不同之稻穀時，若同時增加熱風溫度與風量率，則可發現含水率較高者其乾燥速率較大。故若在低含水率仍以高熱風溫度與高

風量率任意乾燥，甚為不智，且其間將增加許多無謂的能源消耗。所以，如何進一步的以電腦模擬分析並配合實驗方法以求得一最有效、最經濟的乾燥方式，實在是今後應繼續努力的方向。

## 六、摘 要

以電腦模擬方法分析稻穀循環式乾燥機在乾燥過程中，其各種參數的變化時，將可看出若以電腦模擬法應用於循環式乾燥機的設計及改良上，不僅可分析並預測其性能，並可減少許多無謂的能源消耗。因此，若欲達到降低乾燥機利用成本之目的，此方法實有其繼續努力發展的價值。

## 七、謝 啓

本文承蒙臺大農機系馮丁樹、陳貽倫、張漢聖三位教授的細心修正與熱心建議，始得順利完成，謹在此致由衷的謝意。

## 八、參 考 文 獻

- 馮丁樹、賈精石：全省現有小型稻穀乾燥機之使用調查分析。1978. 臺大農工系研究報告第323號。
- Brooker, Bakker-Arkema and Hall: Drying cereal grains. 1974. The AVI publishing Company, Westport, Connecticut, U. S. A.
- F. W. Bakker-Arkema, L. E. Lerew, S. F. De Boer and M. G. Roth: Grain Dryer Simulation. The Michigan State University, Agricultural Experiment Station, East Lansing, U. S. A.
- J. R. Allen: Application of Grain Drying Theory to the Drying of Maize and Rice, University of N. S. W. Sydney, Australia.
- Henderson and Perry: Agricultural Process Engineering. 1970. University of California, U. S. A.
- Mohsenin: Physical Properties of Plant and Animal Materials, 71970. Gordon and Breach Science Publishers. U. S. A.
- Yutaka CHUMA, Satoshi MURATA, Mutsuo IWAMOTO: Measuring the Moisture Diffusion Coefficient of Some Grains of Anomalous Shapes. 農機誌 31:(3)250-255.
- Shingo YAMAZAWA, Shigeru YOSHIZAKI, Takaaki MAEKAWA: Studies on the Drying of Agricultural Products (I) Moisture Transfer between Hull and Hulled Rice during Drying Pause. 33:(2) 農機誌 192-199.
- A. V. Luikov: Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. 1975. Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol 18, 1-14.
- Neman, A. B: The Drying of Porous Solid-Diffusion and Surface Emission Equations. 1931. Trans. Am Inst. Chem. Engr. 27:203-310.



# 中國農業工程學會第廿八屆第二次學術技術研討會

## 序 言

本學會為配合中華農學會71年聯合年會於12月11日下午舉行之中心議題研討會「臺灣農業發展之方向」，經由本會第28屆第3次理監事聯席會議議決本年度參加聯合年會研討之中心議題為「臺灣農業用水之調配」及「臺灣農業機械之發展及農機教育與訓練」，囑由學術技術研討會負責籌辦等語。因此乃由技研會組成籌備小組，請陳副總幹事買函請有關單位及專家學者撰寫有關文稿刊登學報，於聯合年會時共同研討。截至11月中旬共計收到文稿有關配水方面者六篇，農機方面者三篇，並經本會學術組王組長如意編入農工學報，俾便於與會人士之閱讀與研討，此特向撰稿之專家學者致謝。由於聯合年會分配研討中心議題之時間為12月11日下午，僅有半日之時間，因而分配於各位撰稿先生主講之時間僅有15分鐘，顯然不足，情非得已，尚請各位主講人鑒諒並控制講解之時間。附學術技術研討會會程表如後：

學術技術研討會主任委員 易 任 謹識

加速國家建設

厚植復國力量

堅定反共志節

奮勵自強精神