

圓筒倉通風之模擬

Simulation of a Paddy Silo with Aeration

國立宜蘭農工專校農機科助教

林 連 雄

Lian-Hsiung Lin

摘 要

本文所建立之圓筒倉熱傳與質傳通風模式經比較試驗倉實測值與模擬值之結果，指出模式可準確預測通風時穀層間之溫度變化。

發展之通風軟體為交談式，並以電腦輔助繪圖技術顯示分析穀溫變化情形。

關鍵詞：稻穀，通風，模式。

ABSTRACT

The aeration model which involves both heat and mass transfer was applied in this study. There is good agreement between predicted temperature and measured temperature of different layers in a paddy silo.

The developed interactive computer program and computer aided graphic techniques were used to analyze temperature change in a paddy silo with aeration.

Keywords: Paddy, Aeration, Model.

一、前 言

本省自然通風倉貯環境不適合稻穀長期貯藏，因此新建的糧倉大都設有強制通風設備。根據盧與陳(1978)研究指出稻穀貯藏期間米質變劣的主要原因為貯穀溫度過高，一般以不超過40℃為穀溫上限值。所以適時適量的進行強制通風作業，徹底發揮強制通風設備的效益，減少能源的浪費，確有必要加以研究探討。台灣夏季時期大氣溫度介於27℃~29℃之間，相對溼度介於79%~92%之間，貯穀溫度大都在35℃以上(盧等，1977; 盧，1983)

。蔡(1987)指出稻穀溫度與通風溫度相差在3℃以上時，才有顯著通風降溫效果。在高溼環境下只要氣溫與穀溫差距大時亦有降溫效果。

Foster(1967)指出當空氣相對溼度低時，通風降低穀溫速率大，反之，空氣相對溼度高時其速率小。並且不同的通風條件及穀物含水率，會影響穀物通風降溫的極限，當通風溼度低於穀物平衡相對溼度，穀溫可能低於冷卻空氣乾球溫度，其原因是穀物內的水分因蒸發而吸熱，使穀溫下降。而通風溼度高於穀物平衡相對溼度時，穀物會因吸收水分而放熱，而使穀物回暖，因此無論通風多久時間穀溫之平衡溫度均高於冷卻空氣乾球溫度。Hall(1970)

指出降低穀溫 4°C 所增加的安全貯藏期限，相當於降低穀物含水率 1 % 所獲致的貯藏效果。依據一般倉貯經驗得知，保存之稻穀含水率愈低，其安全貯藏期限愈能延長。國內糧政機關規定長久貯存稻穀時，穀物之安全含水率一般在 13 % 以下。

通風機要具備足夠馬力才有足夠風壓克服通風時氣流通過穀層所受的阻力。貯藏稻穀之通風量為每公噸稻穀 $0.05 \sim 0.2\text{CMM}$ (盧, 1986)。近年來本省農會由國外引進 Sulzer-Escher Wyss 公司所生產之冷卻空氣產生器 (GRANI-FRIGOR 穀物冷卻系統) 進行低溫冷卻穀物作業，各種機型之通風量約為每公噸稻穀 $0.49 \sim 1.03\text{CMM}$ (Sulzer-Escher Wyss, 1989)。而當貯穀進行通風作業時，如何判斷穀層間之熱氣已排出倉外，達到通風降溫的效果，除了實地量測穀層間穀溫的變化加以研判之外，也可以應用模擬的方式，預測穀溫變化與通風時間之關係。

本研究之目的即在建立圓筒倉通風數學模式，並透過多組試驗量測之穀溫變化情況來驗證模式的準確度。並將此通風模式建構成交談式的應用軟體，希望提供作為穀倉通風作業自動化操作之參考。

二、通風降低穀溫之數學模式推導

穀倉內穀層為一具有多孔隙的物料，流體通過多孔隙物料層之理論分析，首由 Schumann (1929) 提出，其係假設穀物內部屬於無溫度梯度之一維熱傳導模式。Bakker-Arkema and Bickert (1966) 分析甜菜貯藏時強制通風冷卻之溫度模擬，所發展的方程式類似於 Schumann (1929) 理論，經實驗發現量測之溫度值較理論溫度值低，其主要原因是理論分析時忽略通風時水分蒸發冷卻的效果。穀物通風過程包括熱傳和質傳，本研究根據前人之研究 (Bakker 等, 1967 ; Brooker 等, 1978 ; Lu, 1987)，推導厚層穀物之熱傳與質傳一維通風模式。其假設條件如下：

- (1) 穀物的物理性質均一，如孔隙度、密度、假比重和比熱等。
- (2) 有關空氣和水氣之熱性質為恒值。
- (3) 穀粒間熱傳導現象可忽略不計。並假設穀倉為一絕緣體與外界無熱傳現象。

- (4) 各穀粒內部為均質性，即無溫度和水分梯度，通風時穀物和空氣體積不變。
- (5) 通風時，空氣之焓值與水氣量之變化速率甚小，可略去不計。
- (6) 不考慮穀倉內之穀物、微生物和蠅蟲因呼吸作用所產生之熱量。

參照圖 1，分別考慮控制容積內穀物與孔隙空氣之間之質量平衡和能量平衡關係來推導模式。可得到下列四式熱質傳通風模式：

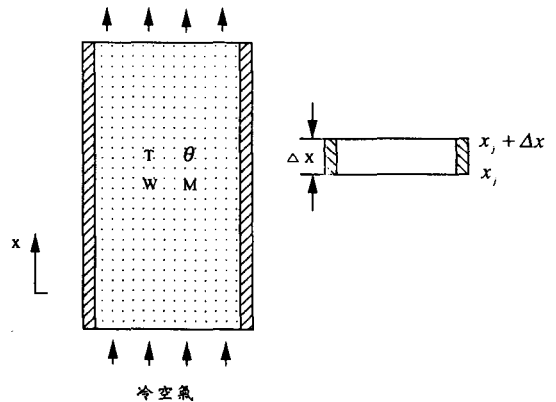


圖 1. 控制容積

1. 穀物層穀物質量平衡分析

在單位時間內，於圖 1 控制容積內穀物含水量之質量平衡關係如下式

$$\int_{t_n}^{t_n+\Delta t} \{ [\text{單位時間內水分移入量}] - [\text{單位時間內水分移出量}] \} dt = [\text{時間為 } t_n + \Delta t \text{ 時控制容積之水分含量}] - [\text{時間為 } t_n \text{ 時控制容積之水分含量}] \dots\dots\dots (1)$$

公式(1)中之各項可再細分如下：

$$\text{單位時間內水分移入量} = [\text{x 方向水分移入量}] + [\text{由孔隙轉移到穀物之水分量}]$$

$$\text{單位時間內水分移出量} = [\text{x 方向水分移出量}] + [\text{由穀物轉移到孔隙之水分量}]$$

穀倉內的穀物，通風時穀層是靜止不動 (Stationary-bed)，所以 x 方向穀物層穀物沒有水分移入和移出。在通風乾燥情況下，由孔隙轉移到穀物之水分量為零。因此(1)式可簡化成(2)式

$$\int_{t_n}^{t_n+\Delta t} \left[0 - \int_{x_i}^{x_i+\Delta x} \gamma_w(x, t) A(1 - \varepsilon) dx \right] dt$$

$$= \int_{x_j}^{x_j+\Delta x} [M(x, t_n + \Delta t) - M(x, t_n)] \rho_s A (1 - \varepsilon) dx \quad (2)$$

公式(2)經應用微分與積分中間值定理後，導致下式

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\frac{\gamma_w}{\rho_s} = -R \quad (3)$$

依據前人研究結果(Wang, 1978; ASAE, 1983)，稻穀水分變化速率R值與平衡含水率之關係式如下：

$$R = B(M - M_e)$$

$$B = [0.168 + 0.007602(\frac{T + \theta}{2}) - 0.1572RH]$$

$$M_e = 0.29394 - 0.046015 \ln[-(T + 35.703)\ln(RH)]$$

2. 穀物層孔隙空氣含水量之質量平衡分析

於圖1控制容積內，氣流所含水氣之質量平衡公式，所包括項目類似於公式(1)，各項細分如下：

單位時間內水氣移入量 = [x方向水氣移入量] + [穀物水分轉移到孔隙之水氣量]

$$= W(x_j, t)G_s A + \int_{x_j}^{x_j+\Delta x} \gamma_w(x, t)A(1 - \varepsilon)dx \quad (4)$$

單位時間內水氣移出量 = [x方向水氣移出量] + [由孔隙轉移到穀物之水氣量]

$$= W(x_j + \Delta x, t)G_s A + 0 \quad (5)$$

控制容積內之水氣量

$$= \int_{x_j}^{x_j+\Delta x} W(x, t)\rho_s A \varepsilon dx \quad (6)$$

將公式(4)，(5)，(6)代入公式(1)經應用中間值定理之後，即得下式

$$G_s \frac{\partial W}{\partial x} = -\rho_s \frac{\partial M}{\partial t} \quad (7)$$

3. 穀物層穀物熱平衡分析

於圖1控制容積內，穀物之熱平衡公式類似於公式(1)，各項細分如下：

單位時間內熱量移入量 = [x方向熱量移入量] + [孔隙空氣轉移到穀物之熱量]

$$= 0 + \int_{x_j}^{x_j+\Delta x} h_v(T(x, t) - \theta(x, t))Adx \quad (8)$$

單位時間內熱量移出量 = [x方向熱量移出量] + [穀物轉移到孔隙空氣之熱量]

$$= 0 + \int_{x_j}^{x_j+\Delta x} \gamma_w(x, t)H_w(x, t)A(1 - \varepsilon)dx \quad (9)$$

控制容積內之熱量

$$= \int_{x_j}^{x_j+\Delta x} [h_d(x, t) + M(x, t)h_w(x, t)] \rho_{sb} Adx \quad (10)$$

將公式(8)，(9)，(10)代入公式(1)經應用中間值定理之後，並代入下列關係式，可得公式(11)

$$\frac{\partial h_d}{\partial t} = C_{ps} \frac{\partial \theta}{\partial t}; \frac{\partial h_w}{\partial t} = C_{pw} \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

$$\rho_s = \frac{\rho_{sb}}{(1 - \varepsilon)}; \gamma_w = -\rho_s \frac{\partial M}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{h_v(T - \theta)}{\rho_{sb}(C_{ps} + MC_{pw})} + \frac{(H_w - h_w)}{(C_{ps} + MC_{pw})} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (11)$$

空氣對流熱傳係數，依據Wang等(1979)其關係式為

$$h_v = 312840 G_a^{1/3}$$

4. 穀物層孔隙空氣熱平衡分析

穀物層孔隙空氣熱平衡公式類似於公式(1)，各項細分如下：

單位時間內熱量移入量 = [x方向熱量移入量] + [穀物轉移到孔隙空氣之熱量]

$$= (H_s(x_j, t) + W(x, t)H_w(x_j, t))G_s A + \int_{x_j}^{x_j+\Delta x} \gamma_w(x, t)H_w(x, t)A(1 - \varepsilon)dx \quad (12)$$

單位時間內熱量移出量 = [x方向熱量移出量] + [由孔隙空氣轉移到穀物之熱量]

$$= (H_s(x_j + \Delta x, t) + W(x_j + \Delta x, t)H_w(x_j + \Delta x, t))G_s A + \int_{x_j}^{x_j+\Delta x} h_v(T(x, t) - \theta(x, t))Adx \quad (13)$$

控制容積內之熱量

$$= \int_{x_j}^{x_j+\Delta x} [H_s(x, t) + W(x, t)H_w(x, t)] \rho_s A \varepsilon dx \quad (14)$$

將公式(12)，(13)，(14)代入公式(1)，經應用中間值定理之後，並代入下列關係式，即可得公式(15)

$$\frac{\partial H_s}{\partial x} = C_{ps} \frac{\partial T}{\partial x}; \frac{\partial H_w}{\partial x} = C_{pw} \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\frac{\partial H_s}{\partial t} = C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t}; \frac{\partial H_w}{\partial t} = C_{pw} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$G_s \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-h_v(T - \theta)}{C_{ps} + WC_{pw}} \quad (15)$$

公式(3)，(7)，(11)，(15)組成模擬通風降溫模式之四個偏微分方程式，此結果與Bakker等(1967)所提出的模擬式相似。應用此推導模式時， θ_0 (穀物初溫)， M_0 (穀物初含水率)， T_0 (進氣溫度)和 W_0 (進氣溼度)為已知。

其初始條件為：

$$\theta(x, 0) = \theta_0$$

$$M(x, 0) = M_0$$

其邊界條件為：

$$T(0, t) = T_0$$

$$W(0, t) = W_0$$

由於通風模式為非線性偏微分方程式，因此很難求得其解析解，擬應用有限差分法 (Finite Difference Method) 求得上述四式之近似解。欲求每一格點 (x, t) 之解，在時間差分使用 forward differences，空間差分使用 backward differences，同時 j 表示 x 方向格點，n 表示時間格點。表示如下：

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_j^{n+1} - M_j^n}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\theta_j^{n+1} - \theta_j^n}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_j^{n+1} - T_{j-1}^{n+1}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{W_j^{n+1} - W_{j-1}^{n+1}}{\Delta x}$$

將上述差分關係式代入通風模式中，模式將試驗倉劃分為 34 個格點，格點間距取 = 0.1 公尺，時間間距取 = 0.0125 小時，即可求得穀物和空氣之溫度與水分變化之穩定結果。

三、試驗設備及方法

(一) 試驗設備

試驗用圓筒倉貯系統如圖 2 所示。使用精密空氣供給裝置 (TABAI, ESPEC, CAU-221 型)，調節控制系統內之溫度與溼度，為達到恆溫恆溼的控制條件，將此倉貯系統置於一密封空間中。圓筒試驗倉使用 pvc 塑膠圓管 (內徑 0.35m)，圓筒高度 3.5m，為確保圓筒倉之絕緣性，於外層包覆厚 14

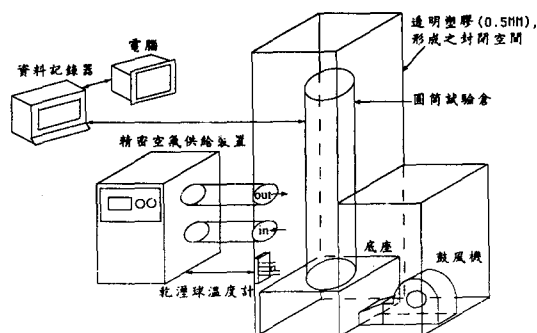
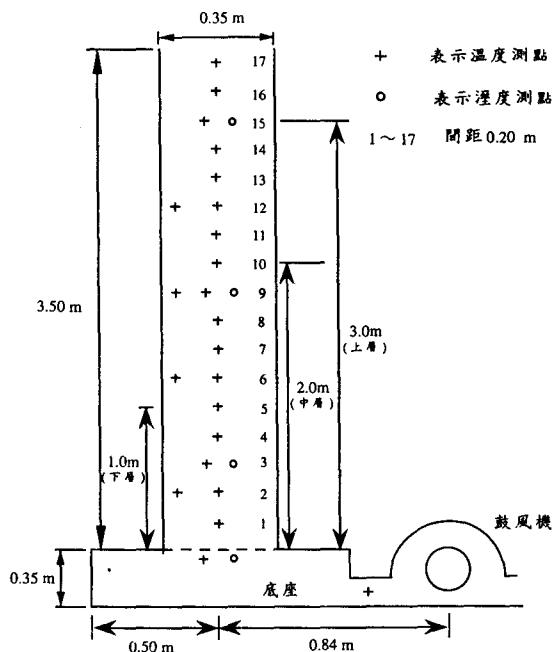


圖 2. 圓筒試驗倉試驗設備組合系統

mm 絕緣材料。試驗用稻穀貯藏量為 0.2 公噸蓬萊稻穀。通風試驗時，使用離心式風機 (順光 SSD 型 1HP) 由下往上壓送空氣通過穀層，通風量為 0.184 CMM，除以穀物總重量 0.2 公噸，所以每公噸稻穀通風量為 0.92CMM，相當於目前農會低溫冷卻稻穀的風量。倉貯系統內裝置 T 型熱偶線及溼度計量測大氣溫溼度及穀層溫度，圓筒試驗倉內溫溼度量測位置如圖 3。倉內溫度及溼度量測位置位於圓筒中心位置，量測點之編號以 1 ~ 17 數字表示。並以量測點編號 5 (高 1.0m)、編號 10 (高 2.0m) 和編號 15 (高 3.0m) 分別代表下層、中層和上層。溫溼度資料藉由自動資料記錄器 (KAYE, DIGI-4-PLUS 型) 蒐集，並透過 RS-232 與 PC 一個人電腦連線。



(註：數字 1~17 表示溫溼度量測位置之編號)

圖 3. 圓筒試驗倉內溫溼度量測位置

(二) 試驗方法

為了驗證理論模式的準確性，本研究進行多組通風試驗，試驗之處理條件包括：稻穀與進氣空氣的溫差和通風溼度。試驗條件如表 1。溫溼度調節裝置的控制精度由表 1 之標準偏差及欲達到之設定溫溼度值，可看出溫度的控制精度在 1 °C 以

表 1. 試驗代號之試驗條件

試驗代號	稻穀初溫平均值℃ (標準偏差)	進氣平均溫度℃ (標準偏差)	稻穀初溫與進氣 溫度之溫差℃	進氣平均溼度% (標準偏差)	稻穀初含水 率% (w.b.)	通風時間 h
1	41.5 (1.5)	21.2 (0.4)	20.2	55.0 (4.1)	13.8	24
2	40.4 (0.7)	20.1 (0.4)	20.3	35.6 (4.2)	14.3	24
3	36.2 (0.8)	21.2 (0.6)	15.0	55.8 (2.5)	14.2	24
4	35.3 (0.9)	20.2 (0.6)	15.2	34.6 (4.8)	13.7	24
5	31.3 (0.5)	20.2 (0.3)	11.1	56.2 (1.6)	14.0	24
6	31.3 (1.1)	20.5 (0.3)	11.0	35.0 (1.6)	13.6	24

內，溼度的控制精度在5%左右，因此模擬時以空氣溫溼度平均值輸入。通風試驗方法如下：

- (1)應用溫度與溼度調節裝置控制系統內環境的條件調製試驗前穀溫，然後啟動鼓風機將環境空氣送入圓筒倉內，藉著空氣的強制對流加熱稻穀，使穀溫達到設定溫度後，停止鼓風機送風，繼續維持系統內環境溫度及溼度條件，靜置4小時左右，待穀溫穩定後，再進行降溫試驗。
- (2)通風試驗前，試驗倉取五個不同穀層位置取樣（間隔0.8m），依次使用電阻式單粒水分測定計（SHIZUOKA SEIKI, CTR-800型）每次測定100顆稻穀，量測每顆稻穀的含水率求其平均值。取樣後用軟木塞及黏土將取樣口封牢，再於表面覆上一層之壓克力板絕緣材料。
- (3)重新調節系統內環境之溫度與溼度，通風空氣平均溫度控制於20.1℃～21.2℃，空氣平均相對溼度控制於34.6%～56.2%，待達到所需之試驗條件後（如表1），即啟動鼓風機，進行通風降溫試驗，倉內各測點溫溼度值由資料記錄器每5分鐘記錄。經過連續24小時通風後，再由與通風前相同穀層位置之取樣口取樣，量測稻穀含水率。

四、結果與討論

模擬圓筒倉通風時，將試驗倉通風前實際量測的穀溫，做為通風模式穀溫的初始條件。使用FORTRAN電腦程式設計穀倉通風模式，程式輸入的參數包括通風空氣溫度、空氣相對溼度、稻穀

表 2. 穀物與空氣之物理性質

符號	名稱	物理量
C_{pa}	乾空氣比熱	1.005 KJ/Kg°C
C_{ps}	穀粒比熱	1.620 KJ/Kg°C
C_{pv}	水蒸氣比熱	1.967 KJ/Kg°C
C_{pw}	水比熱	4.175 KJ/Kg°C
ρ_a	空氣密度	1.165 Kg/m ³
ρ_s	穀物層密度	600 Kg/m ³
ϵ	穀層孔隙度	0.55

初平均含水率、穀層高度、通風時間及鼓風機風速。模擬時，所採用之穀物與空氣之物理性質如表2。程式設計的流程如圖4所示。

穀粒為感溼性物體，會因大氣的乾溼而改變其含水率，而通風模式公式(3)中，稻穀水分變化速率使用薄層含水率方程式，根據盧(1992)研究報告指出，厚層穀物連續強制通風180小時，下層穀物最靠近通風口，因之含水率變化速率最快，中層和上層稻穀含水率變化則較緩和。Pixton(1968)指出穀物乾燥時含水率降低速率較回潮狀態下含水率增加速率快。因此厚層穀物含水率模式，可假設穀層被切割成許多薄層區塊，而區塊與區塊間水分的吸收或釋放假設有一延遲係數，且假設區塊間之延遲係數皆相等。通風過程中，在單位時間內，區塊內穀物含水率減少時，稻穀水分變化乘上含水率減溼延遲係數，反之，當區塊內

穀物含水率增加時，乘上含水率加溼延遲係數。
 假設含水率減溼延遲係數為加溼延遲係數之兩

倍，以穀層高度4公尺為例，在相同通風條件下改變不同延遲係數值，根據穀層溫度值的收斂情形及模擬的結果取加溼延遲係數等於0.25。

(一) 模式驗證

圓筒倉內共量測17點稻穀溫度，每點間隔距離0.2公尺，並以量測位置1公尺、2公尺和3公尺分別代表下層、中層和上層。採用不同穀溫及通風溼度條件來驗證比較通風模式預測值與實測值的一致性。以兩種不同情況為例來探討模擬結

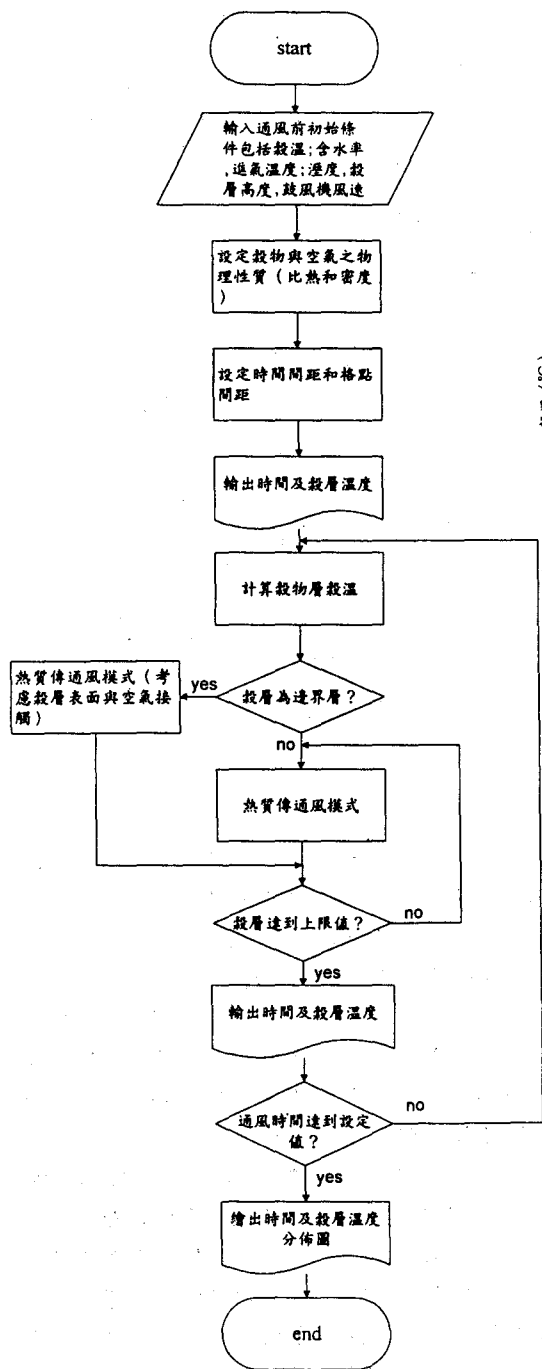


圖 4. 程式設計軟體流程圖

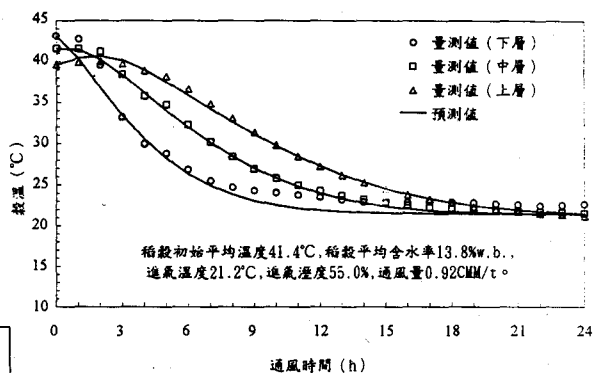


圖 5. 通風中各層穀溫量測值與模擬預測值之比較 (溫差大溼度高)

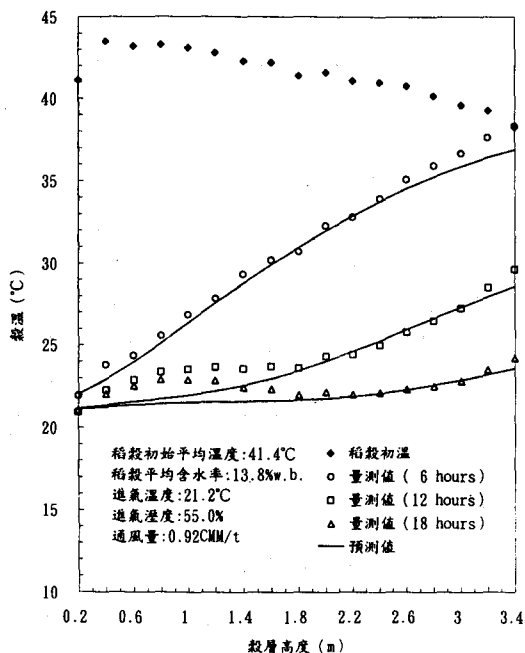


圖 6. 各通風時段下穀層間穀溫值與模擬預測值之比較 (溫差大溼度高)

果。

(1)進氣溼度高初期穀溫與進氣溫差大之試驗驗證

圖 5 為試驗倉下層、中層和上層穀溫量測值與通風模式預測值之比較，通風前實際量測各層穀溫介於 38.3℃～43.5℃，通風中進氣平均溫度 21.2℃，進氣平均溼度 55.0%，連續通風 24 小時穀層溫度即降到 22℃，且通風初期，下層穀溫迅速下降，大量熱氣向上移動，造成中、上層穀溫上

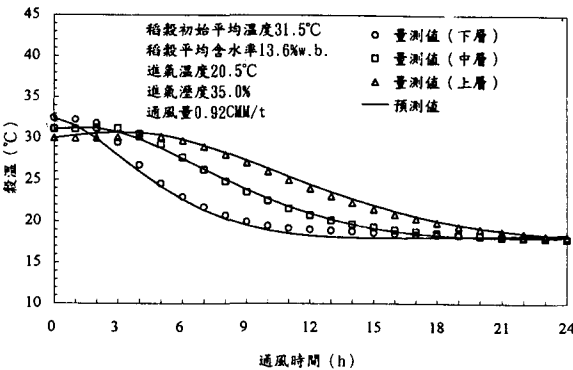


圖 7. 通風中各層穀溫量測值與模擬預測值之比較 (溫差小溼度低)

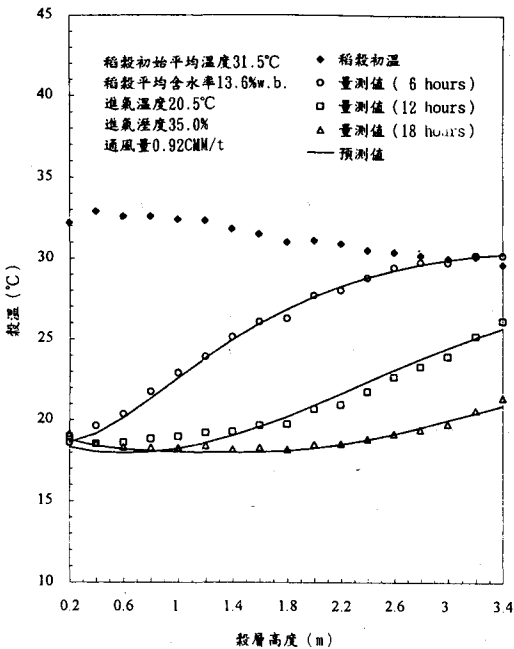


圖 8. 各通風時段下穀層間穀溫量測值與模擬預測值之比較 (溫差小溼度低)

升至某一最高點後再下降的現象，而通風模式可準確預測穀溫變化曲線。圖 6 為各穀層高度在通風第 6、12 和 18 小時穀溫變化，顯示各層穀溫之最大預測誤差在 1℃～2℃之間。

(2)進氣溼度低初期穀溫與進氣溫差小之試驗驗證

通風初期穀層溫度介於 29.4℃～32.9℃，通風過程中，進氣平均溫度為 20.5℃，進氣平均溼度為 35.0%，通風 24 小時後穀層平均溫度約為 18℃，其各層穀溫量測值與模擬預測值之結果如圖 7 所示，通風模式亦能準確預測穀溫變化。在定時間下穀層高度間之穀溫變化曲線如圖 8 所示，量測值與預測值之比較，最大預測誤差在 1℃～2℃之間。

由於溫度與溼度調節裝置所送出的空氣溫度和溼度精度略有小變化，且穀倉內貯穀並不具完全均質性，即各層穀物之物理性質並非一致不

表 3. 通風後最終穀溫量測值與預測值之比較

項目	試驗代號	1	2	3	4	5	6
稻穀初溫平均值℃ (標準偏差)		41.5 (1.5)	40.4 (0.7)	36.2 (0.8)	35.3 (0.9)	31.3 (0.5)	31.3 (1.1)
進氣溫度平均值℃		21.2	20.1	21.2	20.2	20.2	20.5
進氣溼度平均值%		55.0	35.6	55.8	34.6	56.2	35.0
實測最終穀溫平均值℃ (標準偏差)		21.8 (0.5)	17.4 (0.7)	21.3 (0.2)	17.7 (0.7)	19.6 (0.2)	18.1 (0.4)
預測最終穀溫平均值℃ (標準偏差)		21.5 (0.1)	18.1 (0.3)	21.6 (0.1)	18.0 (0.3)	19.7 (0.1)	18.3 (0.3)

變，通風模式之模擬結果，雖然接近實測值但仍無法完全吻合實測值，最大誤差在 1℃～2℃以內。

比較連續通風 24 小時後，實際量測值與模式

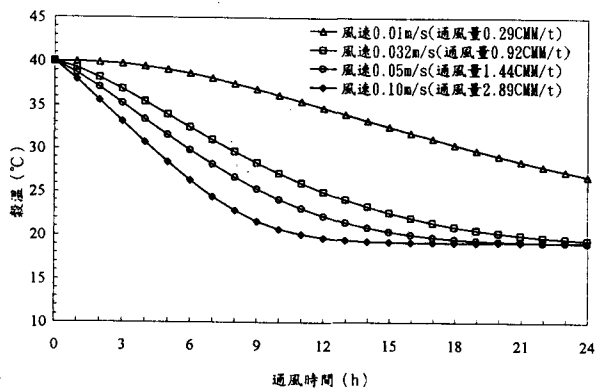


圖 9. 模擬通風風速對中層穀溫變化之關係

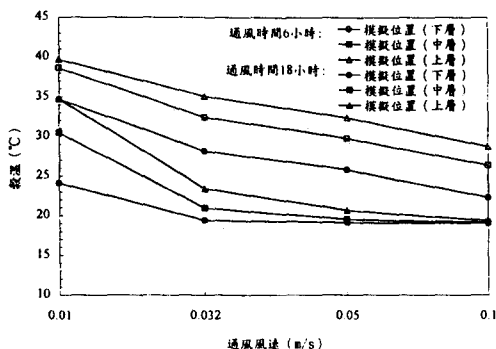


圖 10. 定時間下風速對穀層溫度變化之影響

穀倉強制通風對穀層溫度變化之模擬

按 0 → 回到主螢幕

按 1 → 執行通風模式

按 2 → 印出輸入參數及上、中、下層穀溫

按 3 → 查看輸入參數及上、中、下層穀溫

按 Print Screen (於鍵盤上)

→ 印出穀層溫度變化圖形

圖 11. 通風軟體之主畫面

```

*****
* 請輸入通風空氣溫度, (°C) *
20.0
*****
* 請輸入通風空氣相對溼度, (範圍: 0~1 之間) *
* (小數點兩位) *
0.55
*****
* 請輸入穀倉內稻穀平均含水率 w.b., (範圍: 0~1 之間) *
* (小數點兩位) *
0.13
*****
* 請輸入穀層高度, (公尺) *
4.0
*****
* 請注意: 穀倉內稻穀初始溫度設定條件共分為 →
* 底層、下層、中層、上層、倉頂空氣溫度 (°C) *
*****
* 請輸入穀倉內底層 (0.3 公尺處) 稻穀溫度, (°C) *
42
*****
* 請輸入穀倉內下層 (1.0 公尺處) 稻穀溫度, (°C) *
40.0
*****
* 請輸入穀倉內中層 (2.0 公尺處) 稻穀溫度, (°C) *
40.0
*****
* 請輸入穀倉內上層 (3.0 公尺處) 稻穀溫度, (°C) *
40.0
*****
* 請輸入倉頂 (4.0 公尺處) 空氣溫度, (°C) *
35.0
*****
* 請輸入欲通風多長時間, (小時) *
24
*****
* 請輸入通風風速, (公尺/小時) *
115.2
*****

```

圖 12. 通風條件輸入畫面

```

*****
* 溫度 = 20.0 °C
* 溼度 = .55
* 含水率 = 0.13 溼基
* 平均高度 = 4.0 公尺
* 溫度 = 42.0 °C
* 溫度 = 40.0 °C
* 溫度 = 40.0 °C
* 溫度 = 40.0 °C
* 溫度 = 35.0 °C
* 時間 = 24.0 小時
* 風速 = 115.2 公尺/小時
*****

```

時間 (hr)	下層 (1.0公尺)	中層 (2.0公尺)	上層 (3.0公尺)
0.	40.00	40.00	40.00
1.	38.77	39.75	39.97
2.	36.12	38.86	39.72
3.	33.23	37.37	39.10
4.	30.56	35.56	38.10
5.	28.27	33.65	36.83
6.	26.39	31.78	35.41
7.	24.90	30.04	33.93
8.	23.75	28.45	32.47
9.	22.89	27.04	31.05
10.	22.26	25.81	29.72
11.	21.81	24.76	28.48
12.	21.48	23.88	27.34
13.	21.26	23.15	26.31
14.	21.10	22.57	25.39
15.	20.98	22.10	24.57
16.	20.90	21.74	23.85
17.	20.84	21.46	23.24
18.	20.79	21.25	22.72
19.	20.75	21.09	22.29
20.	20.72	20.97	21.93
21.	20.70	20.88	21.64
22.	20.68	20.81	21.39
23.	20.66	20.76	21.21
24.	20.65	20.72	21.06

* 請按 0 → 回到主螢幕 *

圖 13. 各層級穀溫之模擬預測值畫面

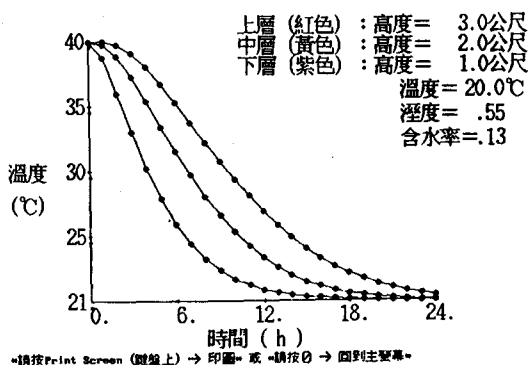


圖 14. 各層穀溫之模擬關係圖畫面

預測穀層間上、中、下層共 17 點的平均穀溫之差異情形，列如表 3 所示。模擬結果與實測值之比較，其誤差介於 0°C ~ 0.7°C 之間。

(二) 模式應用

應用模式可預測各種通風條件下之穀層溫度分佈情況，推測出將熱氣排出倉外所需之通風時間，供穀倉通風作業操作之參考。以圖 2 圓筒試驗倉為例，探討不同風速對穀層溫度變化之影響，圖 9 為風速影響穀溫變化之模擬結果，在貯穀及通風條件相同的情況下，通風風速愈高即通風量愈大，貯穀降溫速率愈快。比較不同穀層位置

在通風時間為 6 及 18 小時下，風速對穀層溫度變化之關係如圖 10 所示。在未完全降溫前，通風風速愈高，穀層間穀溫的差距愈小。在單位時間內風速的高低對各穀層降溫速率的影響，愈上層的穀溫受到風速影響愈顯著，換句話說，上層的穀溫在不同高低風速下，穀溫有較大之差距。

本研究以 FORTRAN 語言設計通風軟體，並以中文顯示結果。圖 11 為軟體操作功能之命令說明。通風軟體設計之功能包括軟體執行時，所輸入之條件以應答的方式輸入，如圖 12 所示。圖 13 為軟體執行過程中依序將模擬的結果顯示於螢幕並記錄於檔案之中。軟體執行結束後直接於螢幕繪出下層、中層和上層穀溫之關係圖，如圖 14 所示。

五、結 論

本研究所建立之圓筒倉熱傳與質傳通風模式，應用數值法模擬通風過程穀物溫度變化之情形。利用實驗室所建立的圓筒試驗倉進行穀倉通風試驗，根據試驗結果顯示，穀溫的模擬值與試驗所得的量測值之誤差甚小。且經由模擬的結果，在貯穀及通風條件相同的情況下，通風風速愈高即通風量愈大，貯穀降溫速率愈快，且穀層間穀溫差距愈小。以 FORTRAN 電腦語言所撰寫之通風應用軟體，採用應答的方式輸入通風的條件，並將模擬的結果依序顯示於螢幕上並記錄於檔案中，模擬結束後並於螢幕上繪出下層、中層和上層穀溫之關係圖。通風應用軟體具有實際應用之價值。

六、符號說明

A = 截面積， $[m^2]$
 C_{p_a} = 乾空氣比熱， $[KJ/kg - ^\circ C]$
 C_{p_s} = 穀粒比熱， $[KJ/kg - ^\circ C]$
 C_{p_v} = 水蒸汽比熱， $[KJ/kg - ^\circ C]$
 C_{p_w} = 水比熱， $[KJ/kg - ^\circ C]$
 G_a = 乾空氣流量， $[kg/h - m^2]$
 H_a = 乾空氣焓值， $[KJ/kg]$
 H_w = 水氣焓值， $[KJ/kg]$
 h_d = 乾穀焓值， $[KJ/kg]$
 h_v = 體積對流熱傳係數， $[KJ/h - m^3 - ^\circ C]$

h_w = 水焓值， $[KJ/kg]$
 M = 穀粒乾基含水率， $[kg \text{ water}/kg \text{ dry solid}]$
 M_e = 穀粒乾基平衡含水率， $[dry \text{ basis}]$
 R = 水分傳輸速率， $[kg \text{ water}/kg \text{ dry solid} - h]$
 RH = 空氣相對溼度， $[decimal]$
 γ_w = 穀物單位時間內單位體積之水分傳輸量， $[kg \text{ water}/h - m^3]$
 T = 空氣溫度， $[^\circ C]$
 t = 時間， $[h]$
 Δt = 時間差， $[h]$
 W = 空氣絕對溼度， $[kg \text{ water vapor}/kg \text{ dry air}]$
 x = 縱向坐標， $[m]$
 Δx = x 方向格點單位長度， $[m]$
 θ = 穀粒溫度， $[^\circ C]$
 ε = 穀層孔隙度， $[decimal]$
 ρ_a = 空氣密度， $[kg/m^3]$
 ρ_s = 穀物密度， $[kg/m^3]$
 ρ_{s_b} = 穀層體積密度， $[kg/m^3]$

七、參考文獻

1. 盧福明、陳貽倫。1978。改善稻穀倉庫機械設備之研究。農業工程學報 24(1)：28-39。
2. 盧福明、賈精石、侯信雄。1977。圓筒倉貯存稻穀之研究。農業工程學報 23(4)：9-23。
3. 盧福明。1983。穀倉機械化作業之研究 II。機械強制通風方式控制貯倉稻穀溫度之效果。農業工程學報 29(1)：52-61。
4. 蔡致榮。1987。強制通風對散裝貯藏稻穀溫度變化之影響。農業工程學報 33(3)：51-66。
5. 盧福明。1986。農業加工工程學。初版，p.284-286。台北：茂昌。
6. 盧福明。1992。強制通風作業影響穀倉貯穀含水率變動因素之研究。國科會專題研究計畫成果報告編號 NSC-80-0409-B002-07。
7. ASAE. 1983. ASAE Data: ASAE D245.4 Agricultural Engineers Yearbook American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI.
8. Bakker-Arkema, F. W. and W. G. Bickert. 1966. A deep-beed computational cooling procedure for biological products. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 9(6):834-836, 845.