

穀倉機械化作業之研究

V. 穀倉強制通風降低穀層溫度效果之模擬

Study on the Mechanization of Grain Storage System

V. Simulation of Forced Aeration of Bulk-Stored Rice in a Warehouse

國立臺灣大學農業機械工程學系副教授

盧 福 明

Fu-ming Lu

摘 要

本文建立穀倉通風時穀溫變化之二次元數學模式。比較穀溫實測值與模擬結果，指出包括質傳遞與熱傳遞之模式可準確預測穀溫變化情形。

Summary

The two dimensional cooling model which involves both heat and mass transfer, predicts paddy temperatures which compare well with the temperatures measured in a warehouse subjected to forced aeration under subtropical weather, i.e., high ambient air temperature and humidity.

一、前 言

穀物貯藏期間，貯倉內穀物溫度主要受到季節溫度變化的影響及穀物或穀層間微生物與蜘蛛因呼吸作用所生成熱量之影響。

穀倉頂層穀物接觸大氣，受到季節溫度變化的影響較大。因之頂層穀溫之年變化量大。反之，中間層穀物溫度比較不受到氣溫的影響。在影響幅度上，氣溫日變化量 10°C 僅促使穀倉表面以下 4 公尺深的穀物產生 1°C 的變化。在影響時效上，由於穀物為不良導體，其熱傳導係數約為 $0.0004 \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$ (為水泥之 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10}$)，因之穀物傳熱慢，氣溫的變化不會立即影響到穀物，即經延遲一段時間之後，穀溫才開始發生變化。夏季最高氣溫的影響於 3 個月之後才使得 1 m 深穀溫上升到最高

點，於 6 個月之後才使 2.5 m 深穀溫達到最高點^(1,2)。

依據筆者在穀倉機械化作業之研究第 II 報指出⁽³⁾，臺灣稻穀倉庫穀溫之日變化量很不明顯，但穀溫之月變化量則較顯著。在穀倉內不同位置但同一深度的穀溫之差異小，約 $1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 。但在同一位置，不同深度穀層間的溫度差異則較為明顯，約 $1 \sim 7^{\circ}\text{C}$ 。

穀物熱傳導係數低，其熱絕緣性高。換言之，穀物散熱不易。因之位於穀倉中間層之穀物除了不易受到氣溫變動的影響，也不易散熱。在長久貯存期間，中間層穀溫一般高於上層和下層穀溫。穀倉內各穀層溫度之差距，導致穀層間空氣產生對流效果，因而促使各層穀物水分發生移轉現象。高溫穀層所蒸散出之水氣，隨空氣對流向上移動時，如上

層穀溫低於露點溫度，水氣即凝附於上層穀物導致穀物回潮現象。各穀層間之穀溫差距較大時，水分移轉造成回潮的現象較為顯著，因之易增加上層穀物含水率，增加穀物變質腐損的機會。

穀物貯藏期間，施行強制式通風方式，可有縮減各穀層溫差的範圍，通風降溫效果請參考筆者已發表研究結果⁽³⁾。通風時穀溫之變化，由下層、中層而上層各有一段降溫的主要時期，其降溫順序為下層最先，中層次之，而上層最後。換言之，通風時穀層內有一冷卻區，由下層逐漸往上層移動。當冷卻區移動至某一穀層時，即值該層穀物降溫的主要時期。隨着冷卻區往上移動，各穀層逐一降溫冷卻下來。最後當冷卻區離開最上面穀層時，即表示熱氣已被排出倉外。通風時，因熱氣向上移動故上層穀溫會上升。當上層穀溫上升到某一最高點才往下降時，即表示大部份熱氣已排出倉外，此時才可停止通風，否則只是將穀倉下層熱氣移轉到中上層而已，達不到通風降溫的效果。

判斷穀層熱氣是否已排出倉外，除了實地進行量測穀溫加以研判之外，也可以模擬方式推測出將熱氣排出倉外所需之通風時間。通風模式可供今後進行穀倉通風作業自動化操作之參考。有關穀倉通風作業自動化操作之可行性研究，可參看筆者已發表著作⁽⁴⁾。

本研究目的，為建立穀倉通風之數學模式，從二次元角度來模擬穀溫變化，並與實測穀溫變化情況來印證模式之準確度。

二、穀倉通風降低穀溫之二次元數學模式

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) 提出熱傳導模式⁽⁵⁾。但因穀物之通風過程包括熱傳與質傳，因之爾後有關穀物通風之模擬大都同時考慮熱與質的傳遞，但多屬一次元模式之分析^(6,7,8)。

$$\int_{t_n}^{t_n + \Delta t} \{[\text{單位時間內水氣移入量}] - [\text{單位時間內水氣移出量}]\} dt$$

$$= [\text{時間為 } t_n + \Delta t \text{ 時控制體積之水氣含量}] - [\text{時間為 } t_n \text{ 時控制體積之水氣含量}] \dots \dots \dots (1)$$

公式(1)中之各項可再細分如下：

$$[\text{單位時間內水氣移入量}]$$

$$= [\text{x 方向水氣移入量}] + [\text{y 方向水氣移入量}] + [\text{穀物水分轉移到孔隙之水氣量}]$$

$$= \int_{y_1}^{y_1 + \Delta y} (G_x W) \Big|_{x_1, y, t} dy + \int_{x_1}^{x_1 + \Delta x} (G_y W) \Big|_{x, y_1, t} dx + \int_{y_1}^{y_1 + \Delta y} \int_{x_1}^{x_1 + \Delta x} R \Big|_{x, y, t} (1 - \varepsilon) \rho_s dx dy \dots \dots \dots (2)$$

本研究為建立二次元穀倉通風降溫之模式。有關假設如下：

1. 穀倉及穀物之物理性質為恒值，例如孔隙率、假比重和比熱等。
2. 有關空氣和水氣之熱性質為恒值。
3. 穀粒間無直接導熱和輻射熱現象。穀倉為一絕緣體，與外界無熱傳現象。各穀粒內部為均質性，即無溫度和水分梯度，穀物體積及通風時空氣體積不變。
4. 通風時，空氣焓值與水氣量之變化速率甚小，可略去不計。
5. 穀倉內之穀物、微生物和蜘蛛因呼吸作用所產生的熱量甚小，可略去不計。

圖1為氣流通過穀倉內任一控制體積(control volume) $\Delta x \times \Delta y \times 1$ 的情形。依據圖1，以下為通風過程對穀物有乾燥現象之熱傳與質傳之分析。圖1方塊內為穀物層，箭頭 G_x 和 G_y 表示氣流在各座標點之流向。有關公式符號代表意義，請參看本文末尾符號說明。

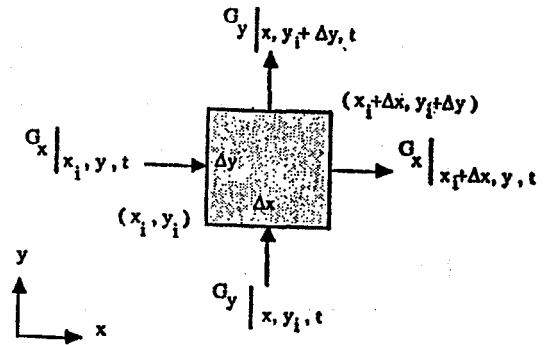


圖1 熱傳與質傳分析之控制體積。(顯示氣流方向及座標位置)

穀物層孔隙空氣含水量之質量平衡分析

在時間由 t_n 到 $t_n + \Delta t$ 之單位時間內，在圖1控制體積內氣流所含水氣之質量平衡關係如下式：

公式(2)中 $R = -\frac{\partial M}{\partial t}$ 。

[單位時間內水氣移出量]

= [x 方向水氣移出量] + [y 方向水氣移出量] + [由孔隙轉移到穀物之水氣量]

$$= \int_{y_1}^{y_1+\Delta y} (G_x W) |_{x_1+\Delta x, y, t} dy + \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} (G_y W) |_{x, y_1+\Delta y, t} dx + 0 \dots\dots\dots(3)$$

將公式(2)和公式(3)代入公式(1)，即得下式(4)。

$$\begin{aligned} & \int_{t_n}^{t_n+\Delta t} \left\{ \left[\int_{y_1}^{y_1+\Delta y} (G_x W) |_{x_1+\Delta x, y, t} dy + \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} (G_y W) |_{x, y_1+\Delta y, t} dx + \int_{y_1}^{y_1+\Delta y} \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} R |_{x, y, t} \right. \right. \\ & \left. \left. (1 - \epsilon) \rho_s dx dy \right] - \left[\int_{y_1}^{y_1+\Delta y} (G_x W) |_{x_1+\Delta x, y, t} dy + \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} (G_y W) |_{x, y_1+\Delta y, t} dx \right] \right\} dt \\ & = \int_{y_1}^{y_1+\Delta y} \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} (W |_{x, y, t_n+\Delta t} - W |_{x, y, t_n}) p_s \epsilon dx dy \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

整合公式(4)等號左端各項得：

$$\begin{aligned} \text{LHS} &= \int_{t_n}^{t_n+\Delta t} \left\{ \int_{y_1}^{y_1+\Delta y} [(G_x W) |_{x_1, y, t} - (G_x W) |_{x_1+\Delta x, y, t}] dy \right. \\ & \left. + \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} [(G_y W) |_{x, y_1, t} - (G_y W) |_{x, y_1+\Delta y, t}] dx + \int_{y_1}^{y_1+\Delta y} \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} \right. \\ & \left. R |_{x, y, t} (1 - \epsilon) \rho_s dx dy \right\} dt \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

微積分中間值定理指出一可微分之連續函數 $f(x)$ 定義於 $a \leq x \leq b$ 區間，則在此區間任何一點 x 可得到(6)和(7)兩關係式⁽⁸⁾。

$$\frac{f(b) - f(a)}{b - a} = \frac{df(x)}{dx} \Big|_{x = a + \xi(b - a)} \quad ; 0 < \xi < 1 \dots\dots\dots(6)$$

$$\int_a^b f(x) dx = f(\xi)(b - a) \quad ; a \leq \xi \leq b \dots\dots\dots(7)$$

公式(5)經應用微積分中間值定理之後，其結果如公式(8)。

$$\begin{aligned} \text{LHS} &= \int_{t_n}^{t_n+\Delta t} \left\{ \int_{y_1}^{y_1+\Delta y} -\Delta_x \left(\frac{\partial G_x W}{\partial x} \right) |_{x^+, y, t} dy + \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} -\Delta_y \left(\frac{\partial G_y W}{\partial y} \right) |_{x, y^+, t} dx \right. \\ & \left. + \int_{y_1}^{y_1+\Delta y} \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} R |_{x, y, t} (1 - \epsilon) p_s dx dy \right\} dt \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

公式(8)經再次應用中間值定理可得公式(9)

$$\begin{aligned} \text{LHS} &= -\Delta x \Delta y \Delta t \left(\frac{\partial G_x W}{\partial x} \right) |_{x^+, y^+, t^+} - \Delta x \Delta y \Delta t \left(\frac{\partial G_y W}{\partial y} \right) |_{x^+, y^+, t^+} \\ & + \Delta x \Delta y \Delta t (1 - \epsilon) p_s R |_{x^+, y^+, t^+} \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

以上(8)式和(9)式中，

$$\begin{aligned} x^+ &= x_1 + \alpha_1 \Delta x & ; 0 \leq \alpha_1 \leq 1 \\ y^+ &= y_1 + \alpha_2 \Delta y & ; 0 \leq \alpha_2 \leq 1 \\ t^+ &= t_n + \alpha_3 \Delta t & ; 0 \leq \alpha_3 \leq 1 \end{aligned}$$

同理，於公式(4)等號右端經應用中間值定理之結果如下式。

$$\begin{aligned} \text{RHS} &= \int_{y_1}^{y_1+\Delta y} (W|_{x^{++},y,t_n+\Delta t} - W|_{x^{++},y,t_n}) \Delta x \rho_s \varepsilon \, dy \\ &= (W|_{x^{++},y^{++},t_n+\Delta t} - W|_{x^{++},y^{++},t_n}) \Delta x \Delta y \rho_s \varepsilon \\ &= \frac{\partial W}{\partial t} \Big|_{x^{++},y^{++},t^{++}} \Delta x \Delta y \Delta t \rho_s \varepsilon \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

上式中，

$$\begin{aligned} x^{++} &= x_1 + \beta_1 \Delta x && ; 0 \leq \beta_1 \leq 1 \\ y^{++} &= y_1 + \beta_2 \Delta y && ; 0 \leq \beta_2 \leq 1 \\ t^{++} &= t_n + \beta_3 \Delta t && ; 0 \leq \beta_3 \leq 1 \end{aligned}$$

演算到此，公式(9)和公式(10)代入公式(4)之後，即得公式(11)。

$$\begin{aligned} &-\Delta x \Delta y \Delta t \left(\frac{\partial G_x W}{\partial x} \right) \Big|_{x^+, y^+, t^+} - \Delta x \Delta y \Delta t \left(\frac{\partial G_y W}{\partial y} \right) \Big|_{x^+, y^+, t^+} \\ &+ \Delta x \Delta y \Delta t (1 - \varepsilon) \rho_s R \Big|_{x^+, y^+, t^+} = \frac{\partial W}{\partial t} \Big|_{x^{++}, y^{++}, t^{++}} \Delta x \Delta y \Delta t \rho_s \varepsilon \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

消去公式(11)等號左右端相同因式。當圖1之控制體積與時間間矩趨近於零，即 $\Delta x \rightarrow 0$, $\Delta y \rightarrow 0$ 和 $\Delta t \rightarrow 0$ ，則取公式(11)之極限值可得公式(12)。

$$-\frac{\partial G_x W}{\partial x} - \frac{\partial G_y W}{\partial y} + R(1 - \varepsilon) \rho_s = \rho_s \varepsilon \frac{\partial W}{\partial t} \dots\dots\dots(12)$$

將下列關係代入公式(12)，並展開包含 $V_x W$ 和 $V_y W$ 之微分式子，則得公式(13)。

$$\begin{aligned} \rho_s &= \rho_{sB} / (1 - \varepsilon) \\ R &= -\partial M / \partial t \\ G_x &= \rho_s V_x \\ G_y &= \rho_s V_y \\ -\rho_s \left[V_x \frac{\partial W}{\partial x} + V_y \frac{\partial W}{\partial y} + W \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) \right] - \rho_{sB} \frac{\partial M}{\partial t} &= \rho_s \varepsilon \frac{\partial W}{\partial t} \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

公式(13)中， $\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0$ 。根據前述假設第4項，即空氣水氣量之變化速率甚小，可略去不計，即 $\frac{\partial W}{\partial t} \rightarrow 0$ 。因之公式(13)可簡化為下式(14)。公式(14)即為穀物層孔隙空氣含水率之質量平衡微分方程式。

$$\rho_s V_x \frac{\partial W}{\partial x} + \rho_s V_y \frac{\partial W}{\partial y} = -\rho_{sB} \frac{\partial M}{\partial t} \dots\dots\dots(14)$$

穀物層穀物熱平衡分析

於圖1控制體積內，穀物之熱平衡公式類似於公式(1)，其平衡式可推演成類似於公式(4)之式子如下：

$$\begin{aligned} &\int_{t_n}^{t_n+\Delta t} \left[\left(\int_{y_1}^{y_1+\Delta y} \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} h_r (T - \theta) \Big|_{x,y,t} dx dy \right) - \left(\int_{y_1}^{y_1+\Delta y} \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (1 - \varepsilon) \rho_s R H_w \Big|_{x,y,t} dx dy \right) \right] dt \\ &= \int_{y_1}^{y_1+\Delta y} \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} (1 - \varepsilon) \rho_s \left[(h_d + M h_w) \Big|_{x,y,t_n+\Delta t} - (h_d + M h_w) \Big|_{x,y,t_n} \right] dx dy \dots\dots(15) \end{aligned}$$

公式(15)經應用中間值定理之後，並代入下列關係式(16)到(19)式之後即得公式(20)。

$$\frac{\partial h_a}{\partial t} = C_{p,a} \frac{\partial \theta}{\partial t} \dots\dots\dots(16)$$

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} = C_{p,w} \frac{\partial \theta}{\partial t} \dots\dots\dots(17)$$

$$\rho_a = \rho_{sB} / (1 - \varepsilon) \dots\dots\dots(18)$$

$$R = -\partial M / \partial t \dots\dots\dots(19)$$

$$h_v(T - \theta) + \rho_{sB} \frac{\partial M}{\partial t} H_w = \rho_{sB} \left(C_{p,a} \frac{\partial \theta}{\partial t} + MC_{p,w} \frac{\partial \theta}{\partial t} + h_w \frac{\partial M}{\partial t} \right) \dots\dots\dots(20)$$

公式(20)經整理移項之後可得穀物層穀物熱平衡微分方程式如公式(21)。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{h_v(T - \theta)}{\rho_{sB}(C_{p,a} + M C_{p,w})} + \frac{(H_w - h_w)}{(C_{p,a} + M C_{p,w})} \frac{\partial M}{\partial t} \dots\dots\dots(21)$$

穀物層孔隙空氣熱平衡分析

穀物層孔隙空氣熱平衡式子類似於公式(1)。經應用中間值定理之後，可得公式(22)。

$$\frac{\partial G_x(H_a + WH_w)}{\partial x} - \frac{\partial G_y(H_a + WH_w)}{\partial y} + (1 - \varepsilon)\rho_a RH_w - h_v(T - \theta) = \varepsilon\rho_a \left[\frac{\partial(H_a + WH_w)}{\partial t} \right] \dots\dots\dots(22)$$

將下列關係式子

$$\frac{\partial H_a}{\partial x} = C_{p,a} \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \frac{\partial H_a}{\partial y} = C_{p,a} \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$\frac{\partial H_w}{\partial x} = C_{p,w} \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \frac{\partial H_w}{\partial y} = C_{p,w} \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$G_x = \rho_a V_x; \quad G_y = \rho_a V_y$$

代入公式(22)，並經集項及消去等號左右端共同項之後，得穀物層孔隙空氣熱平衡微分方程式如公式(23)。

$$-\rho_a V_x (C_{p,a} + WC_{p,v}) \frac{\partial T}{\partial x} - \rho_a V_y (C_{p,a} + WC_{p,v}) \frac{\partial T}{\partial y} - h_v(T - \theta) = \varepsilon\rho_a (C_{p,a} + WC_{p,v}) \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots(23)$$

依據前述假設第4項，空氣焓值之變化速率甚小可略去，因之公式(23)右端等於零。重新整理公式(23)，最後得公式(24)。

$$V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} = - \frac{h_v(T - \theta)}{\rho_a(C_{p,a} + WC_{p,v})} \dots\dots(24)$$

穀物層穀物質量平衡分析

於圖1控制體積內的穀物質量平衡公式類似於公式(1)。經應用中間值定理之後，再經消去同項式則得公式(25)。此公式已應用於前述公式(2)中。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -R \dots\dots\dots(25)$$

依據前人研究結果，稻穀水分變化速率R值及其平衡含水率公式如下列二式^(10,11)。

$$R = \left[.168 + .007602 \left(\frac{T + \theta}{2} \right) - .1572 RH \right] (M - M_s) \dots\dots\dots(26)$$

$$M_s = 0.29394 - 0.046015 \ln[-(T + 35.703) \ln(RH)] \dots\dots\dots(27)$$

公式(14)、(21)、(24)和(25)為模擬穀倉通風降低穀溫之效果所需之四個偏微分方程式。由於很難得到上述四式之解析解，因之由數值法應用有限差分法解上述四式，即可模擬通風過程中穀溫之變化情形。

三、穀倉通風降低穀溫之模擬結果與討論

依據前述二次元模式，模擬一稻穀倉庫之通風降溫效果。被模擬倉為新竹縣新豐鄉農會松柏林倉庫第14號鋼筋水泥穀倉。穀倉座向南北，倉內長29公尺寬11.6公尺，共100坪，貯穀高度6公尺，共貯存70年1期蓬萊穀1123公噸。試驗倉地面下設有三條通風溝，各距4.5公尺，並各別配備有7.5馬力通風機，靜壓70mm水柱，風量100CMM。

以T型熱偶線量測穀溫之位置計有上層(谷層面下1公尺)，中層(谷層面下2.5公尺)，下層(谷層面下4公尺)和底層(5.5M)。有關量測溫度之位置與模擬穀倉之斷面圖，請參考筆者已發表之研究報告^(3,12)。

模擬時，所採用之穀物與空氣之物理性質如下：

- 稻穀比熱 = 1.620 KJ/Kg-°C
- 空氣比熱 = 1.013 KJ/Kg-°C
- 水氣比熱 = 1.967 KJ/Kg-°C
- 水比熱 = 4.175 KJ/Kg-°C
- 稻穀積比熱 = 972 KJ/m³-°C

空氣積比熱=1.1416 KJ/m³·°C

空氣密度=1.127 Kg/m³

穀層密度=600 Kg/m³

穀層孔隙=0.55

空氣對流傳熱係數 $h_v=312840 G_a^{1.3}$

應用數值法求解公式(14)、(21)、(24)和(25)之前，必須先求得穀倉內各點之風速，其方法如筆者已發表之研究報告⁽¹²⁾。有關穀層單位深度之風壓降公式為 $\Delta p/\Delta L=4282V^{1.1674}$ 。有關通風降低穀溫效果之試驗報告，已發表於筆者在穀倉機械化作業之研究第2報內⁽⁹⁾。以下為比較穀溫實測值與模擬值之分析結果。

實際通風時穀溫之變化如圖2。通風前各層穀溫介於 38~39.5°C。通風中大氣溫度介於 26.8~29.4°C，相對濕度介於81~93%。通風6小時之後，下層和底層穀溫降低到36.1°C 和 32.6°C。但上層與中層穀溫反而仍高居41°C和39.6°C。此表示熱氣已由底層和下層往上移到中上層。圖2也顯示當大氣相對濕度較高時約90%，各層穀溫幾乎維持於

定值。此表示在高濕度下之通風降溫效果較差。

比較各層穀溫實測值與模擬估計值之結果如圖3~6。若將包括熱傳與質傳的數學模式，即公式(14)、(21)、(24)和(25)等四個偏微分方程式所包括之穀物水分和空氣水氣之質變量設定為零，即可得僅含兩個偏微分方程式之熱傳模式。圖3~6亦比較熱傳模式的模擬效果。比較穀溫之位置為穀倉中間風溝上之各層穀物。

圖3~6指出熱傳模式所估計之穀溫變化與實測值差異較大因之不宜用於預測穀溫變化之用。反之包括質傳與熱傳之模式可準確預測穀溫變化。由於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變，故本研究所發展模式之模擬結果雖接近實測值但仍無法完全吻合實測值。例如圖6中，上層穀溫之預測值略高於實測值 2~3°C 今後研究方向之一將探討非均質性穀倉通風降溫之模擬分析。有關穀倉內穀溫等溫線分佈情況將於下次報告中討論之。

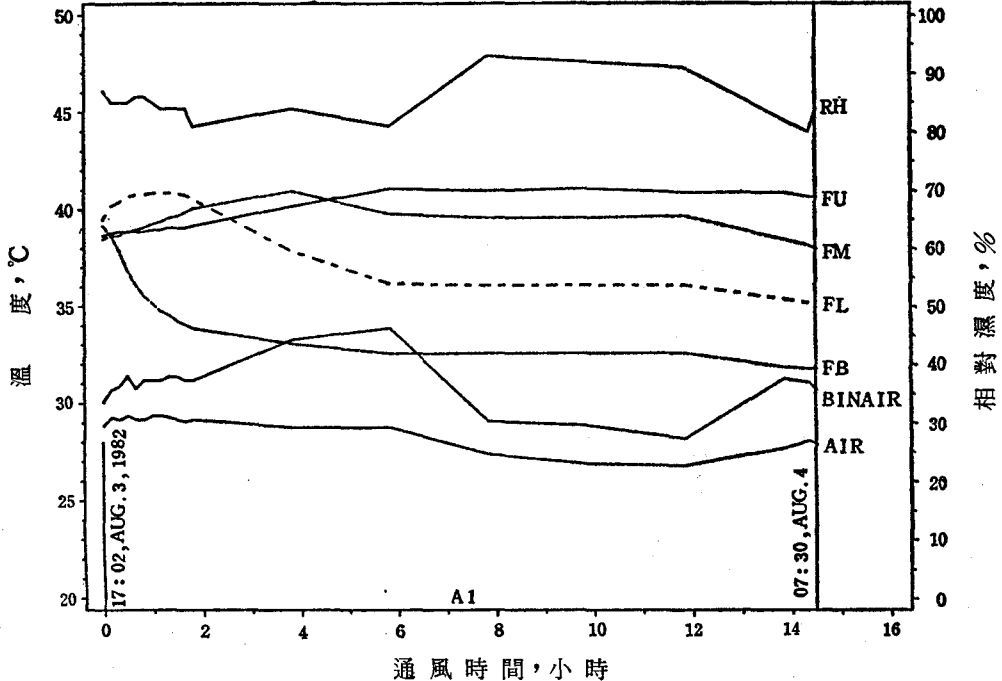


圖2 通風中實際量測各層穀溫變化情形。

RH=相對濕度，AIR=空氣溫度，BINAIR=倉頂空氣溫度，FU，FM，FL 和 FB 為中間風溝上方之上、中、下和底層穀溫，AI 指通風期間。

四、結 論

本研究為有關穀倉機械化作業之系列研究之第五號報告。主要為建立穀倉通風之二次元數學模式，用以預測通風過程穀物溫度之變化情形。經比較穀溫實測值與模擬值之結果，指出包括質傳遞與熱傳遞之模式可較準確預測穀溫變化情形。本研究所推導之模式具實用價值。

五、符號說明

- $C_{p,a}$ = 空氣比熱
- $C_{p,s}$ = 穀物比熱
- $C_{p,v}$ = 水氣比熱
- $C_{p,w}$ = 水比熱
- G_a = 乾空氣流量
- h_v = 對流熱傳係數
- H_w = 水氣焓值
- h_w = 水焓值
- M = 乾基含水率
- M_o = 平衡乾基含水率
- R = 水分傳輸速率
- RH = 相對濕度
- T = 空氣溫度
- t = 時間
- V_x = x 軸方向空氣流速
- V_y = y 軸方向空氣流速
- W = 絕對濕度
- ϵ = 穀層孔隙率
- ρ_a = 空氣密度
- ρ_s = 穀物真比重
- ρ_{sB} = 穀物假比重
- θ = 穀物溫度

六、參考文獻

1. Sinha, R. N. 1973. Interrelations of physical, chemical, and biological variables in deterioration of stored grains. In: Grain storage: part of a system, edited by R. N. Sinha and W. E. Muir, The AVI Publishing Co.
2. Smith, C. V. 1969. Meteorology and grain storage. Technical Note No.101, World Meteorological Organization. Geneva.
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穀物溫度之效果。中

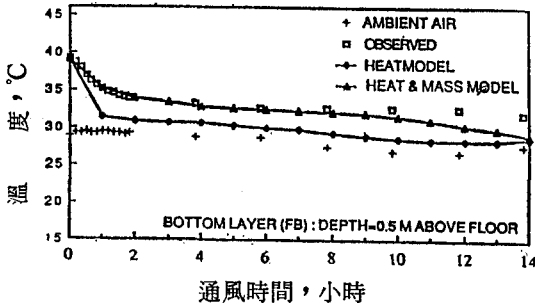


圖 3 底層穀溫實測值與模擬預測值之比較。

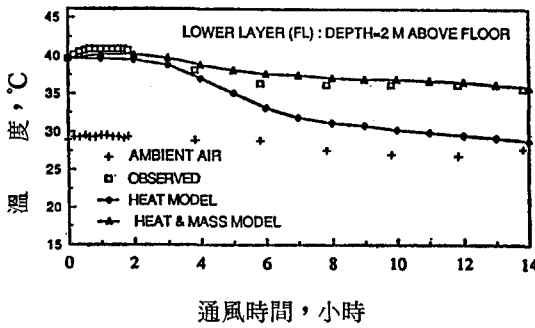


圖 4 下層穀溫實測值與模擬預測值之比較。

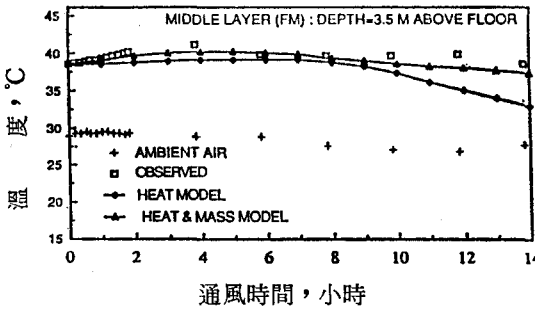


圖 5 中層穀溫實測值與模擬預測值之比較。

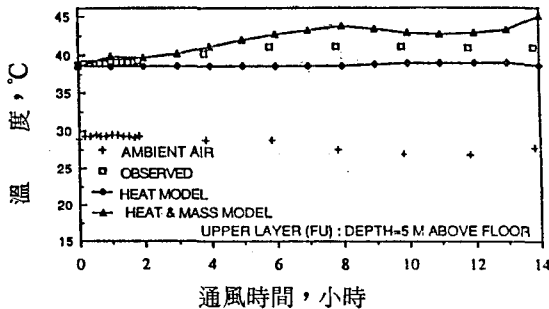


圖 6 上層穀溫實測值與模擬預測值之比較。

- 國農業工程學報29(1):52~61。
4. 盧福明。1987。穀倉機械化作業之研究Ⅲ，稻穀倉庫穀溫監視及通風機械自動化操作系統。中國農業工程學報33(4):17~24。
 5. Schumann, T. E. W. 1929. Heat transfer: a liquid flowing through a porous prism. J. of the Franklin Institute, 208, 405-416.
 6. Boyce, D. S. 1966. Heat and moisture transfer in ventilated grain. J. Agric. Engng Res. 11(4):255-265.
 7. Bakker-Arkema, F. W. and W. G. Bickert. 1966. A deep-bed computational cooling procedure for biological products. Transaction of ASAE 9(6): 834-836, 845.
 8. Sutherland J. W., P. J. Banks and H. J. Griffiths. 1971. Equilibrium heat and moisture transfer in air flow through grain. J. Agric. Engng Res. 16, 368-386.
 9. Holland, C. D. and A. I. Liapis. 1983. Computer methods for solving dynamic separation problems. McGraw-Hill Book Company, New York.
 10. Wang, C. Y. 1978. Simulation of thin-layer and deep-bed drying of rough rice. Ph. D. dissertation, University of California, Davis, California.
 11. ASAE. 1983. ASAE Data: ASAE D245.4 Agricultural Engineers Yearbook American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI.
 12. 盧福明。1988。穀倉機械化作業之Ⅳ，機械強制通風倉庫穀層風壓及風速分佈之模擬。中國農業工程學報34(1)46-52。

(交接第75頁)

21. Lilley, D.G. 1977. "Swirl Flows in Combustion: A review", AIAA J., Vol. 15, p. 1063-1078.
22. Lilley, D.G. 1973. "Prediction of Inert Turbulent Swirl Flows", AIAA J., Vol 11, p. 55-56.
23. Drewry, J.E. 1978. "Fluid Dynamics Characterization of Sudden-Expansion Ramjet Combustor Flowfields", AIAA J., Vol. 16, No. 4.
24. El-Mahallawy, F.M., El-Banhawy, Y. H. and Khalil, K.H. 1977. "Effect of Combustion and Similarity between Hot and Cold Flow Patterns in a Cylindrical Oil Fired Furnace", Ist Conference on Mechanical Power Engineering.
25. Launder, B.E. and Spalding, D.B. 1972. Lectures in Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, London.
26. Jones, W.P. and Launder, B.E. 1972. "The Prediction of Laminarization with a Two Equation Model of Turbulence", International Journal Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp. 301-304.
27. Launder, B.E. and Spalding, D.B. 1974. "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Comput, Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 3.
28. Pun, W.M. and Spalding, D.B. 1977. "Ag. Computer Program for Two-Dimensional Elliptic Flow", MTS, 17612.
29. Streeter, V.L. and Wylie, E.B. 1985. Fluid Mechanics, Intercontinental Photocomposition Co., p. 207.
30. Patankar, S.V. and Spalding, D.B. 1972. "A calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows". Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 15, p. 1787.
31. Patankar, S.V. 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation.
32. Patankar, S.V. 1979. "A Calculation Procedure for Two-Dimensional Elliptic Situations", Numerical Heat Transfer, Vol. 2.
33. Spalding, D.B. 1972. "A Novel Finite-Difference Formulation for Differential Expressions Involving Both First and Second Derivatives", Int. J. Num. Methods Eng., Vol. 4, p. 551.
34. Caretto, L.S., Gosman, A.D. Patankar, S.V. and Spalding D.B. 1972. "Two Calculation Procedures for Steady, Three-Dimensional Flows with Recirculation", Proc. 3rd Int. Conf. Num. Methods Fluid Dyn. Paris, Vol. II, p.60.