

強制通風對散裝貯藏稻穀溫度變化之影響

Effect of Aeration on the Temperature Variations of Rough Rice in Bulk Storage

臺灣省農業試驗所農機系助理

蔡 致 榮

Jyh-Rong Tsay

摘 要

本研究以容積為 0.035m^3 之通風試驗槽裝填70年第一期硬稻，放置於恆溫恆濕器內模擬穀倉通風作業，以觀察強制通風時稻穀溫度的變化情形。各組實驗之控制條件分別設定為通風量介於 $0.25\sim 1.66\text{CM/TON}$ ，模擬空氣溫度介於 $20\sim 32^\circ\text{C}$ ，模擬空氣相對濕度介於 $60\sim 90\%$ ，稻穀起始溫度則有 40°C 與 35°C 兩種。

綜合結果可得下列各點：

1. 強制通風時通風量及稻穀與空氣間溫差是影響降溫速率的主要因素。通風量愈大時，通風降溫速率也愈大，反之亦反；而稻穀與空氣間溫差影響通風降溫速率的情形亦類似，唯通風後期當稻穀與空氣間溫差降低至 $2\sim 3^\circ\text{C}$ 左右時無降溫效果，此時應停止通風以節約能源之消耗。

2. 統計方法逐步迴歸分析的結果，降溫速率可被表成通風量，稻穀與空氣間溫差及空氣相對濕度的函數，其迴歸方程式如下所示，將使本研究之論點更形有力。

$$\text{CR} = 0.5368 - 0.0139\text{RH} + 0.7681\text{AF} + 0.0825\text{TD}, R^2 = 0.8550$$

3. 由穀層下方進風時稻穀溫度之變化依序由下層、中層到上層先後各有一降溫的主要時期，因此實行強制通風作業時，須俟上層稻穀經過主要降溫時期以後，才能確切發揮通風降溫的效果。

Abstract

The experiment is a simulation study of the effect of air temperature and humidity on the temperature transition of rough rice in bulk storage under forced aerating condition. The air temperature and humidity were simulated to represent typical weather condition in Taiwan by controlling an environmental test chamber. A small scale experimental circular bin loaded with rough rice of 13 % moisture content was placed in the environmental test chamber for aeration study.

The experimental treatments were determined by the random combination of four factors such as air flow rate (AF, $0.25\sim 1.66\text{CMM/}$

TON), air temperature (TA, 20-32°C), air humidity (RH, 60-90%) and initial rice temperature (TG0, 35-40°C).

The results obtained from the study showed that air flow rate and the initial temperature difference (TD) between rice and air before aeration were the dominating factors on the rice temperature descending rate (CR) during aeration. The more the air flow rate is the larger the rice temperature descending rate is. With respect to the effect of the temperature difference, the same results were found. However, no cooling effect was detected if the temperature difference was reduced to 2-3°C. From the outputs of stepwise regression procedures, the rice temperature descending rate can be expressed as a function of air flow rate, initial temperature difference and air humidity. The regression equation listed below with $R^2=0.855$ will validate the preceding

$$CR=0.5368-0.0139 RH+0.7681 AF+0.0825 TD$$

Since the results showed that at some hours after upward aeration the maximum rice temperature descending rate for each top, middle and bottom layer in the test bin were detected first at bottom layer, then at middle layer and finally at top layer, thus the aeration period must be long enough to let the rice temperature descending rate for top layer reach its maximum value.

Key words: aeration, temperature variations, rough rice

一、前言

臺灣近十年來稻穀的年平均產量約在 300萬公噸左右，為最大宗的農產品^{(1)*}。大部份稻穀以散裝或袋裝方式貯存於各地農會的鋼筋水泥造平倉，貯藏期限大都超過一年以上，其重量損耗率約介於 0.165~2.406%，進倉時稻穀含水率應在13%以下⁽²⁾。而在倉貯管理方面，一般都以貯穀溫度的高低為管理的量測指標。本省舊型散裝穀倉大都使用竹篾通風筒採自然通風方式，並於倉內裝設窗型抽風機配合自然通風，但此法僅可排出倉內穀面上的熱空氣，並不能有效排除穀層間的熱氣，因此稻穀大都長期處於 35~40°C 的高溫狀態。倘稍疏於翻倉與通風，易使穀溫超過 40°C 以上，而造成貯穀品質的敗壞⁽³⁾。是故有效的通風降溫方式，在倉貯管理上是必要的。近年來新建的中小型糧倉大都備有強制通風裝置，用以控制穀溫。由試驗結果指出在本省氣候條件下利用強制通風方式，可有效的控制稻穀溫度^(3,4,5)，唯需改進通風技術⁽⁶⁾。

在改進通風技術上，吾人應以徹底發揮強制通風設備的功能，以適時適量通風為原則，來尋求最佳的強制通風條件，以提供現場通風作業時的學理根據。本文乃是於實驗室內，利用通風試驗槽來模擬散裝穀倉強制通風作業對稻穀溫度變化之影響，以期建立有關稻穀通風的學理資料，進而改善通風技術。其目的為探討強制通風時大氣溫度和濕度及通風量影響稻穀降溫速率的趨勢。

二、文獻探討

(一)空氣通過穀層的阻力

以強制通風機壓送空氣流經穀層時，由於穀粒間孔隙小，空氣流動比較不順暢，於是風量會因穀層的阻力作用而逐漸減少，因此在設計與分析通風或乾燥系統時，考慮空氣通過穀層時的阻力是很重要的。圖 1 為空氣通過穀層時通風量與壓力降的關係圖⁽¹¹⁾，一般稱為薛德圖 (Shedd's Chart)。圖 1 的曲線可以公式(1)表示之。

* [註] 括號內數字製示參考文獻號碼。

$$Q=0.0007282 \exp \left[0.864 \ln \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \right], R=0.999 \dots \dots \dots (1)$$

公式(1)中， ΔP 為壓力降 (Pa)， L 為穀層深度 (m)， Q 為單位面積之風量 ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$)， R 為相關係數。公式(1)係根據圖 1 曲線作線性迴歸所得的結果，其適用範圍為風量在 0.006 至 $0.2 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ 之間。

Calderwood⁽⁸⁾ 指出稻米、糙米與白米在不同裝填程度下 (鬆填與緊壓)，對空氣流動所產生的

阻力互不相同，茲將其研究結果轉換為公制單位列於表 1，並將有關稻穀的資料繪成薛德圖型態如圖 2 所示，比較圖 1 與圖 2 之穀層對空氣流動的阻力互有些微差異，其原因或為稻穀品種之不同、或為穀粒大小與裝填密度等測定條件不同所造成的結果。

(二)貯穀強制通風之標準通風量

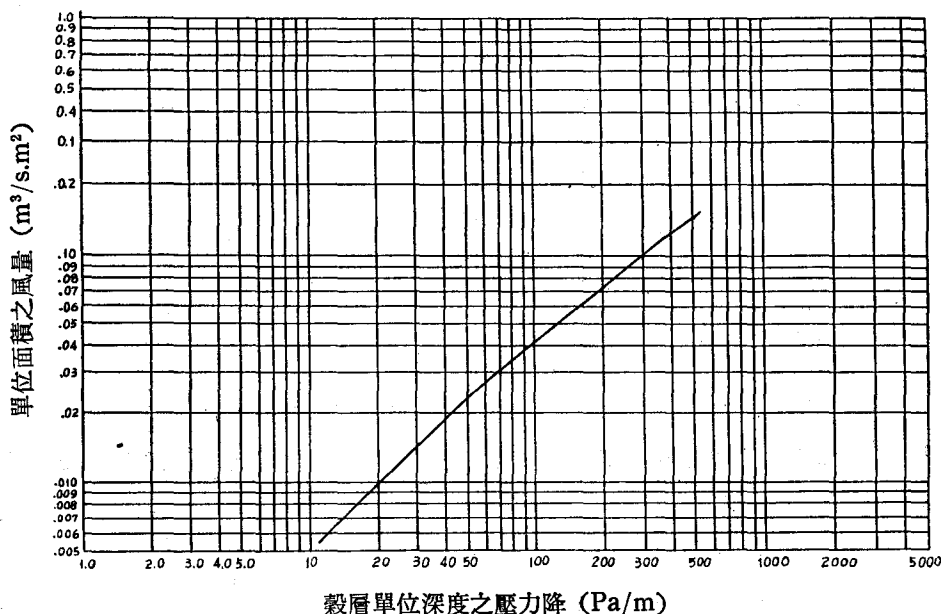


圖 1 稻穀的薛德圖⁽¹¹⁾

附註：上圖以未經鎮壓而自行堆積之乾淨乾穀為對象，在本分甚高時 (平衡相對濕度超過85%) 上述壓力值實際上應以80%計算，而當穀物經過鎮壓其阻力將比上述值增加50%。

貯藏穀物之通風量一般採用 0.104 CMM/TON (0.1 cfm/bu ，每英斗為60磅)。在美國貯藏穀物通風作業的通風量標準以公制表示之如表 2⁽⁹⁾。另外不同的資料指出，貯藏稻穀通風量之標準於日本約為每公噸稻穀 0.15 CMM ，美國為 $0.062 \sim 0.124 \text{ CMM}$ ⁽⁴⁾，倘與表 2 所示美國南部各州的通風量標準比較，其值略有差異但差距並不大。

(一)強制通風的現象分析

(1)通風時穀物蒸發冷卻的現象

Foster⁽¹⁰⁾ 指出通風作業時蒸發冷卻促使穀物

溫度下降所佔的比率，隨著冷卻空氣與穀物間溫度差的增加而增大，而冷卻空氣與穀物間溫度差維持固定時，冷卻空氣溫度高時蒸發冷卻的效果較顯著，此種關係如圖 3 所示。

(2)冷卻空氣相對濕度影響穀物溫度變化的情形

空氣相對濕度低時通風降低穀物溫度的速率大，反之亦反，此種關係如圖 4 所示⁽¹⁰⁾。圖 4 中 C 線為低濕情況，A 線為高濕情況，而 B 線為在穀物含水率所對應的平衡相對濕度情況下通風時穀物溫度的變化情形。

表1 稻穀、糙米與白米的空氣阻力⁽⁸⁾

風 量 ($\text{m}^3/\text{s}-\text{m}^2$) $\times 10^3$	每 公 尺		深 度 的		壓 力 降 (cm水柱/m)			
	稻穀 (試驗1)	緊壓	稻穀 (試驗2)	緊壓	糙 米	米	白	米
	鬆填		鬆填		鬆填	緊壓	鬆填	緊壓
長 粒 型 穀 (Belle Patna)								
5.49	0.125	0.292	0.146	0.354	0.167	0.417	0.145	0.442
10.97	0.271	0.625	0.292	0.646	0.312	0.875	0.333	0.896
21.95	0.562	1.375	0.583	1.458	0.604	1.792	0.625	1.896
43.89	1.208	2.917	1.292	3.000	1.292	3.625	1.312	3.896
54.86	1.625	3.771	1.708	3.958	1.729	4.875	1.729	5.104
82.29	2.833	6.250	2.875	6.625	2.875	8.667	2.812	8.458
109.73	4.000	9.167	4.125	9.667	4.167	11.521	4.250	12.250
164.59	7.000	15.833	7.167	16.979	7.167	20.375	7.083	21.083
充 填 密 度 kg/m^3	639.1	728.8	626.3	714.4	754.5	879.4	786.5	921.1
中 粒 型 穀 (Nato)								
5.49	0.125	0.375	0.146	0.375	0.187	0.542	0.158	0.521
10.97	0.271	0.750	0.312	0.792	0.395	1.125	0.333	1.125
21.95	0.583	1.625	0.625	1.750	0.771	2.333	0.667	2.312
43.89	1.250	3.500	1.333	3.833	1.708	5.167	1.458	4.437
54.86	1.667	4.500	1.750	4.896	2.250	6.667	1.917	6.417
82.29	2.792	7.542	2.979	8.333	3.729	10.917	3.167	10.333
109.73	4.125	11.125	4.250	11.667	5.562	15.750	4.625	15.083
164.59	7.333	19.500	7.479	20.250	9.542	26.667	8.083	26.000
充 填 密 度 kg/m^3	640.7	733.6	623.1	722.4	808.9	935.5	821.7	962.7

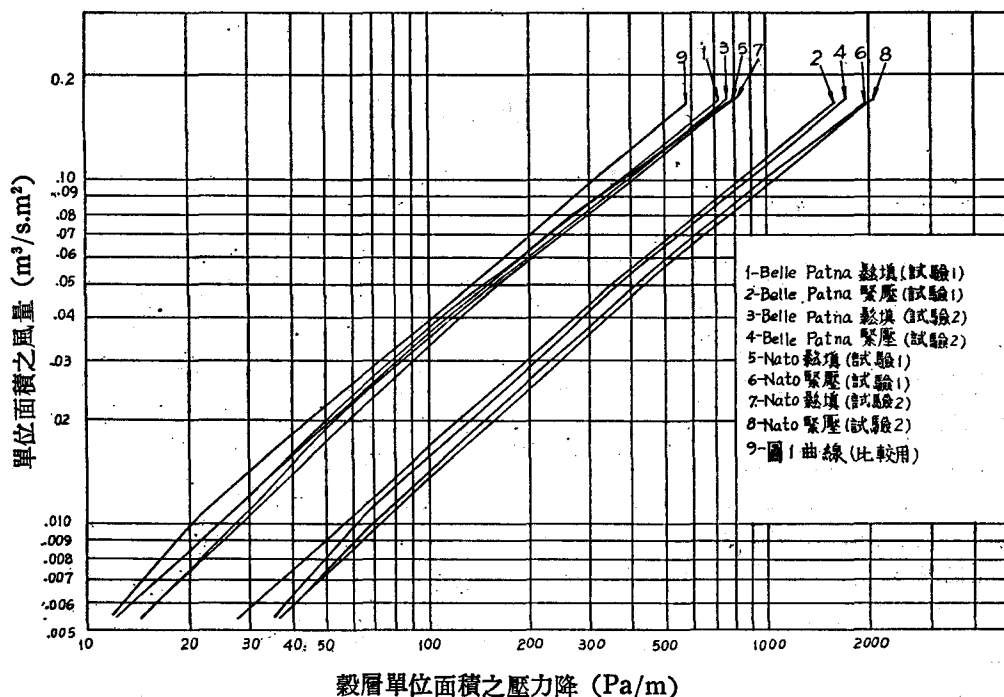


表2 美國貯穀通風作業的通風量標準^{(9)*}

貯存方式	通風量 (CMM/TON)	
	南部各州	北部各州
農家用倉	0.052~0.26	0.052~0.104**
平倉	0.052~0.26	0.052~0.104
筒倉	0.052~0.104	0.026~0.052

* 本標準適用於適當條件下之間歇通風

**對連續作業而言，則為0.017~0.035CMM/TON

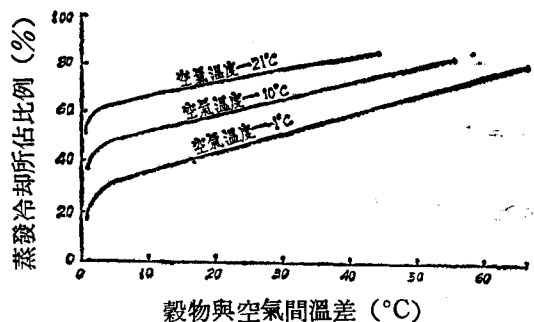


圖3 通風時蒸發冷却佔全部冷却量的百分率⁽¹⁰⁾

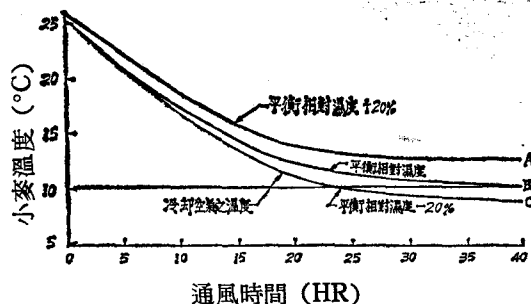


圖4 冷却空氣的相對濕度對穀物溫度的影響⁽¹⁰⁾

三、實驗方法

(一)實驗設備

本實驗所使用主要儀器設備有：

- (1)通風試驗槽，如圖5.1所示。（內徑30cm，高72cm）
- (2)恒溫恒濕器，如圖6所示。（TABAI, MODEL MPP-3E，準確度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ， $\pm 5\%\text{RH}$ ）
- (3)自動資料記錄器，如圖7所示。（RAMP/

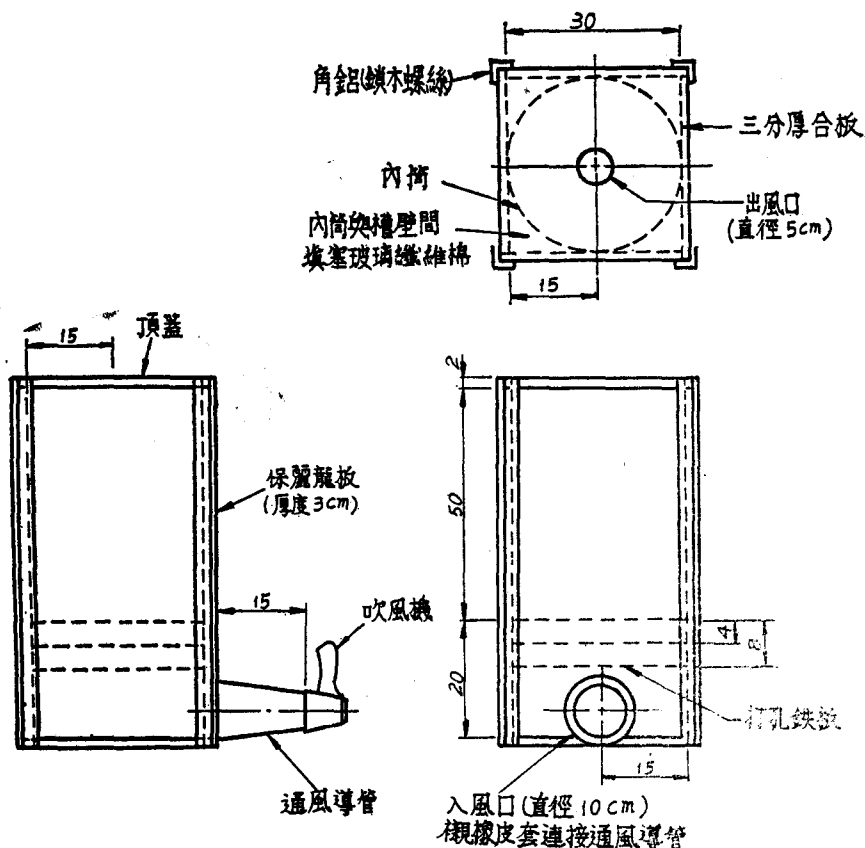


圖5.1 通風試驗槽組合

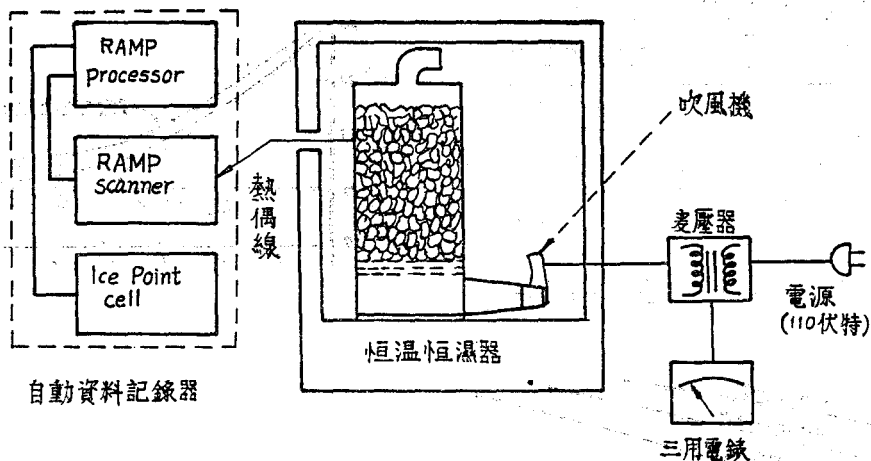


圖5.2 實驗設備組合系統

Processor, KAYE Instruments, 準確度 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$)

(4)自製靜壓量管，如圖 8 所示（管徑1.2cm，長 50cm，底部以橡皮填塞成圓形，於其上方鑽3排直徑 1.2mm 的靜壓孔，每排 8 個共24個。）

(5)傾斜壓力計，如圖 8 所示。（Airflow Developments 4 & 5 型，準確度0.1mm水柱）

(6)熱式風速計，如圖 9 所示。（KANOMAX，MODEL 24-6111，準確度於溫度介於 $0\sim 80^{\circ}\text{C}$ 時為FS之 5 %）

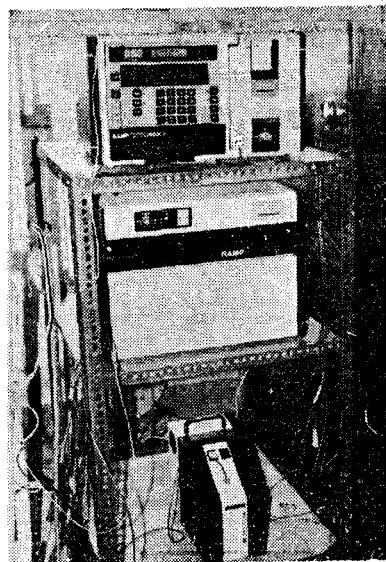


圖 7 自動資料記錄器

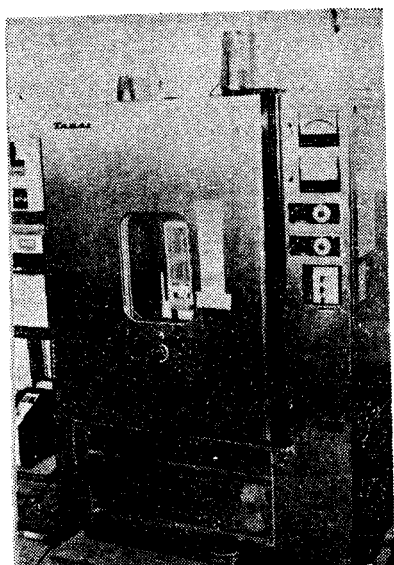


圖 6 恒温恒濕器

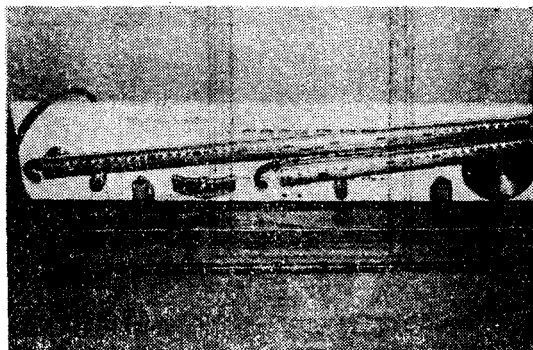


圖 8 自製靜壓量管與傾斜壓力計

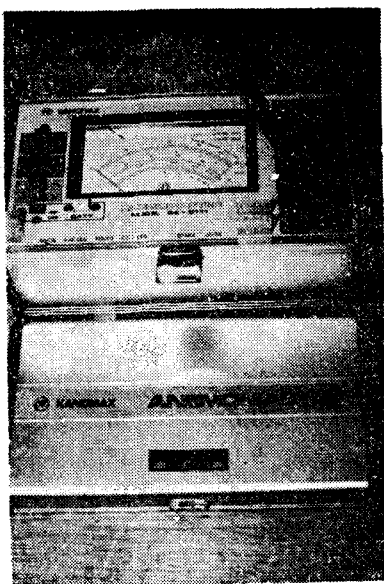


圖9 熱式風速計

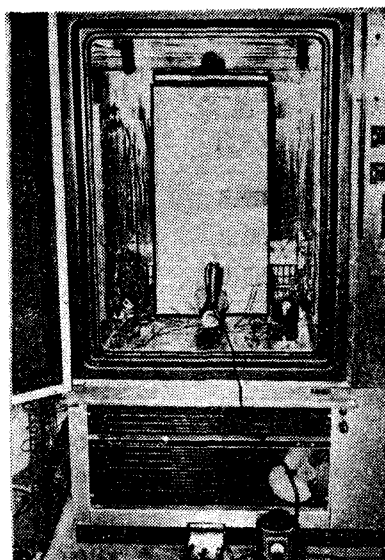


圖10 通風試驗槽置於恒溫恒濕器內之情形

實驗設備組合系統如圖5.2所示。110伏特的電源經變壓器調變之後，隨時以三用電錶檢視電壓，確保吹風機運送固定風量進入通風槽內。穀溫變化的溫度訊號經由通風試驗槽內之T型熱偶線傳送到RAMP/Scanner，經轉換為數值訊號後由RAMP/Processor 定時自動顯示並列印溫度數據。熱偶線於穀層內之配置情形如圖11所示，有上、中、下三層，每層各有前、後兩測點，共有六個穀溫測點。

本實驗使用70年第一期台農67號秈稻，於各組實驗中反覆使用同一批稻穀裝填入通風試驗槽內，每組實驗結束後即將其倒出靜置室內使穀溫回復至接近大氣溫度，待進行另一組實驗時再重新裝填稻穀，如此既可減低各組實驗間之相互影響，亦可避免穀層因長期堆置所產生的壓實 (Compact) 作用。

(二) 實驗說明

(1) 模擬空氣溫度

模擬空氣溫度係指實驗過程中恒溫恒濕器所控制的溫度。本實驗所控制的模擬空氣溫度有20、26與32°C三種，分析時取用實驗過程中實際的空氣溫度值。

(2) 模擬空氣濕度

模擬空氣濕度係指實驗過程中恒溫恒濕器所控制的相對濕度。本研究所控制的模擬空氣濕度有70%、80%與90%三種。

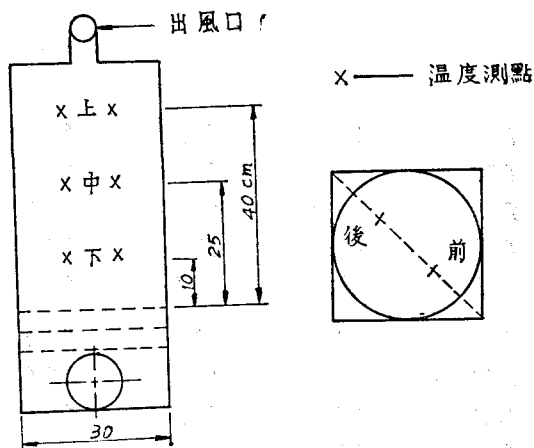


圖11 穀層內熱偶線之擺設情形

(3) 通風試驗與通風系統

通風試驗乃在於觀察試驗槽內稻穀受外界模擬狀況及通風量影響的趨勢。而通風系統乃指加裝吹風機與通風導管的試驗槽及裝填於試驗槽內的稻穀所組成之系統。

(4) 通風量

本實驗由吹風機所能產生的最小穩定風量為每分鐘每公噸稻穀0.25立方公尺 (CMM/TON)，於此風量下通風槽內穀層高度在2公分與40公分兩位置之間的壓力降為0.15mm水柱。當壓力降調為0.3mm水柱時，通風量約為0.99CMM/TON；

表3. 通風試驗各組控制之條件與稻穀降溫速率值

組 別	稻 穀 起 始 溫 度 (°C)	模 擬 空 氣 溫 度 (°C)	模 擬 空 氣 相 對 濕 度 (%)	通 風 量 (CMM/ TON)	稻穀與空 氣間溫差 (°C)	降 溫 時 間 (hr)	CR (°C/hr)
A01	39.8	19.9	88.2	0.25	19.9	25.5	0.87
A02	39.8	20.0	75.3	0.25	19.7	26.5	0.84
A03	35.0	20.1	76.2	1.66	14.9	8.	2.19
A04	39.9	31.9	66.0	0.99	8.	7.25	0.94
A05	35.1	32.0	88.0	1.66	3.1	6.75	0.43
A06	40.0	20.0	92.0	0.99	20.0	15.	1.89
A07	35.1	26.0	88.0	0.99	9.0	13.5	0.73
A08	35.0	19.9	88.7	1.66	15.1	12.0	0.12
A09	35.0	31.9	88.4	0.25	3.1	19.5	0.15
A10	40.2	32.0	88.7	1.66	8.2	6.25	1.37
A11	35.5	32.0	76.4	0.25	3.5	20.5	0.15
A12	35.3	25.9	67.5	1.66	9.4	7.25	1.38
A13	35.3	31.9	64.3	0.25	3.4	18.	0.14
A14	40.2	31.8	65.3	0.25	8.4	16.	0.44
A15	40.0	25.9	76.3	0.99	14.1	12.	1.28
A16	35.1	20.1	89.4	0.25	15.0	36.	0.48
A17	40.0	31.7	79.1	0.99	8.9	6.5	1.03
A18	35.2	26.0	87.6	1.66	9.2	10.5	1.24
A19	40.2	26.0	76.9	0.25	14.2	12.	1.04
A20	40.2	25.8	79.1	1.66	14.3	6.	2.38
A21	40.3	31.9	83.7	0.99	8.4	9.	0.99
A22	39.9	26.1	85.6	0.25	13.8	24.	0.69
A24	36.0	19.8	76.5	0.99	16.2	9.5	1.72
A25	35.1	31.8	76.0	0.99	3.3	7.25	0.44
A26	35.0	26.1	72.7	1.66	8.9	4.75	1.62
A27	35.1	26.1	83.6	0.25	9.0	30.	0.41
A28	35.4	19.8	65.1	0.25	15.6	18.	0.82
A29	35.7	32.3	84.9	0.99	3.4	14.5	0.24
A30	35.2	20.1	74.8	0.25	15.1	15.5	1.01
A31	35.1	20.2	84.4	0.99	14.9	33.	1.33
A32	34.9	26.0	74.9	0.25	8.9	14.25	0.56
A33	35.1	32.1	75.1	1.66	3.0	4.25	0.58
A34	35.3	25.9	66.2	0.99	9.4	6.5	1.57
A35	35.1	19.6	61.0	1.66	15.5	7.25	2.38

附註：A23組實驗失敗數據從缺。

而壓力降調為 0.5mm 水柱時，通風量約為 1.66 CMM/TON。本實驗即採用上述三種風量 (0.25、0.99與 1.66CMM/TON)，其乃在通風槽頂部裝上一導風管以引導並穩定氣流，利用熱阻式風速計量測風速；取平均風速與導風管截面積相乘求得通風量。

(5)穀溫量測高度

穀溫量測高度係指熱偶線埋設點距離通風槽底部打孔鐵板的高度，也即稻穀與打孔鐵板接觸點算起到熱偶線測點之高度，實驗中穀層總高度為45cm，其穀溫量測高度分別為10（下層）、25（中層）與40cm（上層）。

(6)試驗前稻穀溫度之處理與稻穀起始溫度之定義

通風試驗前的穀溫比室溫還高，因此實驗進行前必先處理穀溫使合於要求，其處理之原則主要在使穀溫達各組實驗開始時所需之溫度並使穀層間溫差愈小愈好，但實際上吹風機處理穀溫總有溫差存在，因此當中層稻穀的溫度升至所需之設定溫度時，即認為穀溫已達要求而結束處理。稻穀起始溫度乃指實驗前上、中、下三層共六個溫度測點的溫度平均值。實驗中稻穀起始溫度設定為 40°C與 35°C兩種。

(7)稻穀與空氣間溫差

稻穀與空氣間溫差係指稻穀起始溫度與實驗中模擬空氣溫度的差異值，在稻穀起始溫度為 40°C時有20、14與 8°C等三種溫差，在稻穀起始溫度為 35°C時有15、9與3°C等三種溫差。

(8)通風時間

各組通風試驗的通風時間不一致，當稻穀溫度降低的度數等於未通風前稻穀與空氣間溫差值的90%時，即行停止通風試驗。

(9)各組實驗代號與處理

表3.為依照隨機順序完成的34組通風試驗之控制條件。今以 A1 組為例說明，A1 組的稻穀起始溫度為39.8°C，模擬空氣的溫度與相對濕度分別為 19.9°C與88.2%，通風量為 0.25CMM/TON，稻穀與空氣間溫差為19.9°C，通風實驗歷時25.5小時。

(10)中層稻穀於50%降溫時的平均降溫速率 CR (°C/hr)

為了比較各實驗組合中稻穀的平均降溫速率，

吾人以中層稻穀降溫達實驗前稻穀溫度與模擬空氣間溫度差值的50%時，所需的時間來相互比較，亦即中層稻穀50%溫降時的平均降溫速率，其計算方式如公式(2)所示。

$$CR = \frac{\Delta T}{2 \times t} \dots\dots\dots (2)$$

公式(2)中， ΔT 為實驗前中層稻穀溫度與模擬空氣間溫度差值 (°C)， t 為中層稻穀降溫達 ΔT 值的 50 %時所需的時間 (hr)。表3.列有各組通風試驗時中層稻穀之 CR 值。

(⇒)實驗程序：

將實驗用稻穀均勻混合後倒入通風槽內，使達預定之穀層高度，然後把通風試驗槽（不蓋頂蓋）放入恒溫恒濕器內，裝上處理穀溫用的吹風機，並重新設定恒溫恒濕器處理狀況。俟一切準備就緒後，啟動恒溫恒濕器，但恒溫恒濕器內的溫度與相對濕度合於要求，即開動處理用吹風機，以協助稻穀升溫至實驗所需的稻穀起始溫度。當稻穀達到起始溫度時，即刻蓋上通風槽頂蓋，並調整恒溫恒濕器至達所欲模擬的通風狀況，再開動吹風機進行通風試驗。實驗進行期間以自動資料記錄器定時記錄穀溫變化，當稻穀溫度降低的度數等於未通風前稻穀與空氣間溫差值的90%時，即行停止通風試驗。

四、結果與討論

(一)結 果

本實驗自1982年7月開始至1983年4月為止，共計得通風試驗34組。各組稻穀溫度隨時間變化之情形詳見參考文獻7。今以 A8 組為例（如圖12），說明穀溫變化之情形如下：A8 組之模擬空氣溫度為 19.9°C，模擬空氣相對濕度為 88.7%，通風量 1.66CMM/TON。通風前上中下三層稻穀的溫度，分別為 33.9、35.2與 35.9°C，通風停止後上中下三層稻穀溫度降為 21.8、21.6與 21.5°C。此組通風試驗歷時12小時，通風初期於實驗開始至第3小時間，上層穀溫有先升高再下降之現象即穀溫回升；於實驗開始至第 1.5小時間，中層穀溫亦有回升之現象。表4.列出通風試驗前後各組之上中下層稻穀溫度與上中層穀溫回升時段。

(二)討 論

1.通風試驗稻穀溫度變化的共同趨勢

表4. 各組通風試驗前後之稻穀溫度回升時段

組 別	通風前穀溫 (°C)			通風後穀溫 (°C)			回升時段 (hr)	
	上	中	下	上	中	下	上	中
0.25 CMM/TON								
A01	38.4	40.3	40.8	22.1	21.9	20.9	—	0-1
A02	38.8	39.7	41.0	22.4	21.9	20.3	—	0-2
A09	34.4	35.1	35.4	32.5	32.4	31.8	0-4	0-4.3
A11	34.2	35.4	37.0	32.2	32.4	32.3	0-7	0-5
A13	33.7	35.0	37.1	32.1	32.3	31.8	0-1	0-5
A14	37.9	40.0	42.7	33.1	32.9	32.8	0-2	—
A16	33.9	35.3	36.2	21.1	21.6	21.0	—	0-3
A19	39.3	40.1	41.3	30.1	27.5	26.4	—	0-2
A22	38.3	40.3	41.0	27.3	27.5	27.3	0-2.2	0-2.2
A27	33.6	35.4	36.3	26.6	26.8	26.6	0-5.5	0-4
A28	33.8	35.0	37.3	21.1	21.5	21.2	—	0-3
A30	34.4	35.2	36.0	22.8	21.5	21.2	0-2.5	0-2.1
A32	34.3	35.0	35.5	28.0	26.9	26.2	0-3	0-3.4
0.99 CMM/TON								
A04	37.0	39.7	43.0	33.3	32.8	34.4	0-3	0-1
A06	38.8	40.3	40.8	22.0	21.9	21.8	0-3.3	0-1.3
A07	34.2	35.3	35.7	27.3	26.9	26.8	0-4	0-2.1
A15	39.0	40.2	40.7	27.7	27.5	27.3	0-3	0-2
A17	39.4	39.8	40.8	34.7	32.5	30.8	0-2.5	0-2
A21	39.5	40.4	40.9	33.5	32.8	32.6	0-3.2	0-1.7
A24	35.8	35.3	37.0	25.4	22.2	21.6	0-2.75	0-1.7
A25	34.2	35.2	35.9	32.5	32.3	32.4	0-4.2	0-1.5
A29	36.7	36.1	34.4	33.2	33.2	33.2	0-5.8	0-2.2
A31	33.7	35.4	36.2	21.9	22.1	22.1	0-4.2	0-2.2
A34	33.1	34.9	37.8	26.7	26.6	28.1	0-2.7	0-1
1.66 CMM/TON								
A03	34.5	35.0	35.5	22.5	21.3	20.9	0-1.5	0-1
A05	34.4	35.2	35.7	32.4	32.3	32.2	0-3.6	0-1.5
A08	33.9	35.2	35.9	21.8	21.6	21.5	0-3	0-1.7
A10	39.5	40.3	40.8	33.7	32.8	32.4	0-2.5	0-1.25
A12	33.1	35.2	37.5	27.2	26.7	27.8	0-2.8	0-1
A18	34.1	35.4	36.2	27.0	26.9	26.9	0-3.2	0-1.3
A20	39.6	40.0	40.9	29.4	27.4	27.0	0-1.5	0-1
A26	34.4	35.1	35.6	30.3	27.7	26.0	0-2.3	0-1.1
A33	34.6	35.1	35.7	33.4	32.0	31.5	0-3	0-1.3
A35	33.2	35.0	37.1	22.5	21.6	21.7	0-2.2	0-0.8

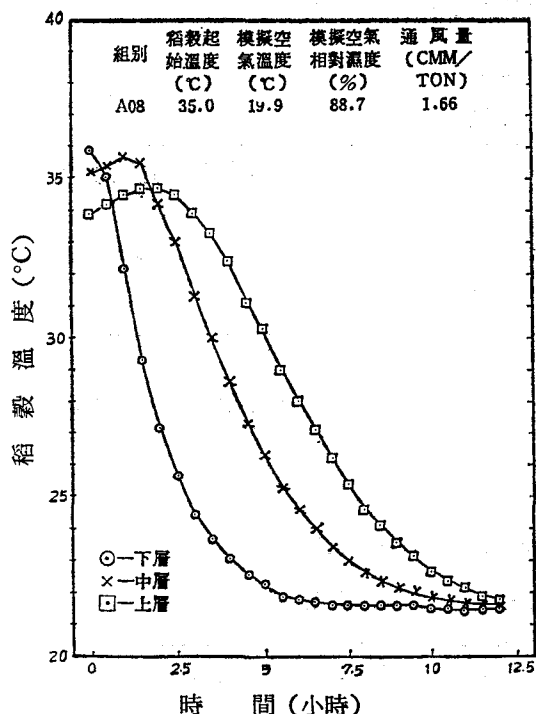


圖12 通風試驗A8組之穀溫變化

(1)通風初期，下層穀溫即刻下降，而中層與上層穀溫則或有先上升後下降之回升現象。此乃因通風時的冷空氣首先接觸下層的稻穀，帶走一部份熱量使下層的稻穀溫度即刻下降。當冷空氣繼續往上移動時，由於通風試驗前處理穀溫所造成下層稻穀溫度最高、中層次之、上層最低的溫差效果，使得經下層加溫後的空氣對中、上層穀溫略低的稻穀加溫作用，因此，通風初期中上層穀溫可能有回升現象。通風試驗各組中上層穀溫回升時段如表4所示，可知穀溫回升時段隨著通風量之增加而遞減。

(2)通風試驗中稻穀降溫過程可分為快速降溫期與緩慢降溫期兩階段，此兩階段以稻穀溫度與模擬空氣溫度間的溫差值降低至約 2~3°C 時為分界點。此乃因通風前期穀溫與空氣間之溫差值大，降溫能力強，當穀溫與空氣間之溫差值減少至 2~3°C 左右時，降溫能力變弱，雖仍有些微的降溫能力，但所需的通風時數相對地增加。因此，通風後期當穀溫與空氣間溫差值減少至 2~3°C 左右以後，倘再繼續通風則效果不佳，應停止通風以避免無謂的電力耗費。

(3)向上通風稻穀溫度由下層、中層而上層各有一降溫的主要時期，其先後次序為下層最先，中層

次之，而上層最後。因此可知，通風時穀層內有一冷卻區 (Cooling zone)，由下層逐漸往上移動，當冷卻區移動至某一穀層時，是那一層稻穀降溫的主要時期，而隨著冷卻區之往上移動，穀層逐一被冷卻下來，最後當冷卻區離開穀層時，即表示可能的降溫效果都已發揮，倘再繼續通風只能使通風系統最後與恒溫濕器內的狀況達成平衡而已。於是，吾人可得一經驗法則，即由穀層下方實行通風作業時，務必等上層稻穀經歷降溫的主要時期以後，才能確切發揮通風降溫的效果。

2. 稻穀起始溫度對通風降溫速率的影響

為了比較稻穀起始溫度、稻穀與空氣間溫差、空氣相對濕度與通風量各因子對稻穀溫度變化的影響，吾人把各組實驗中，控制條件約略相等的組合歸屬成一區集(Block)進行分析，其結果歸納如表5。今以影響因子稻穀起始溫度為例說明，欲比較不同的稻穀起始溫度對通風降溫的影響，吾人把各組實驗中模擬空氣溫度、相對濕度與通風量彼此約略相等的組合歸屬一區集，共得10個區集如表6所示。表6中除了第2區集外共有9個區集呈現一相同趨勢，即對不同起始溫度的稻穀進行通風時，若模擬空氣溫度、濕度及通風量相同時，通風結果為高起始溫度的稻穀其CR值較高，亦即高起始溫度的稻穀，其平均降溫速率比低起始溫度稻穀的平均降溫速率大，此乃因高起始溫度的稻穀與空氣間存有較大的溫度差，降溫能力較強之故。

Foster⁽¹⁰⁾ 指出通風作業時，蒸發冷卻促使穀物溫度下降所佔的比率，隨著冷卻空氣與穀物間溫度差的增加而增大的理論可用來解釋此種高起始溫度稻穀平均降溫速率大的現象。茲以圖13為例說明此種現象，圖中A10組的稻穀起始溫度為40.2°C，A5組的稻穀起始溫度為35.1°C，共同的通風條件為空氣溫度32°C、相對濕度88%、通風量1.66 CMM/TON。比較兩組通風過程中之降溫速率，稻穀起始溫度為40.2°C的降溫速率恒比稻穀起始溫度為35.1°C者為大。

3. 穀層位置與通風降溫速率的關係

通風時隨著穀層位置之不同，上中下三層稻穀各有一降溫的主要時期，此種情形顯示如圖14，通風第2小時是下層稻穀降溫的最快速時期，通風第4小時是中層稻穀降溫的快速時期，通風第6小時是上層稻穀降溫的最快速時期；上中下三層降溫主

表 5. 通風試驗各因子影響降溫速率之比較區集總結

影 響 因 子	總 區 集 數	違 反 共 同 趨 勢 之 區 集 數	共 同 趨 勢
稻 穀 起 始 溫 度	10	1	高起始溫度的稻穀其 CR 值較大
稻 穀 與 空 氣 間 溫 差	12	2	稻穀與空氣間溫差愈大其 CR 值愈大
空 氣 相 對 濕 度	12	3	空氣相對濕度愈低其 CR 值愈大
通 風 量	12	2	通風量愈大其 CR 值愈大

表 6 稻穀起始溫度影響通風降溫速率之比較區集

區 集	組別	稻 穀 起 始 溫 度 (°C)	模 擬 空 氣 溫 度 (°C)	模 擬 空 氣 相 對 濕 度 (%)	通 風 量 (CMM/ TON)	稻 穀 與 空 氣 間 溫 差 (°C)	CR
1	A01	39.8	19.9	88.2	0.25	19.9	0.87
1	A16	35.1	20.1	89.4	0.25	15.0	0.48
2*	A02	39.8	20.0	75.3	0.25	19.7	0.84
2*	A30	35.2	20.1	74.8	0.25	15.1	1.01
3	A05	35.1	32.0	88.0	1.66	3.1	0.43
3	A10	40.2	32.0	88.7	1.66	8.2	1.37
4	A06	40.0	20.0	92.0	0.99	20.0	1.89
4	A31	35.1	20.2	84.4	0.99	14.9	1.33
5	A13	35.3	31.9	64.3	0.25	3.4	0.14
5	A14	40.2	31.8	65.3	0.25	8.4	0.44
6	A17	40.0	31.7	79.1	0.99	8.9	1.03
6	A25	35.1	31.8	76.0	0.99	3.3	0.44
7	A19	40.2	26.0	96.9	0.25	14.2	1.04
7	A32	34.9	26.0	74.9	0.25	8.9	0.56
8	A20	40.2	25.8	79.1	1.66	14.3	2.38
8	A26	35.0	26.1	72.7	1.66	8.9	1.62
9	A21	40.3	31.9	83.7	0.99	8.4	0.99
9	A29	35.7	32.3	84.9	0.99	3.4	0.24
10	A22	39.9	26.1	85.6	0.25	13.8	0.69
10	A27	35.1	26.1	83.6	0.25	9.0	0.41

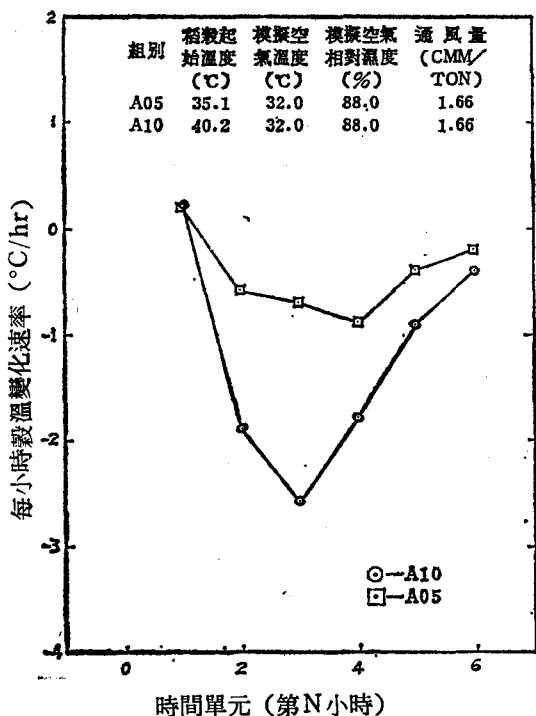


圖13 不同稻穀起始溫度對通風降溫速率的影響 (A10 與 A5)

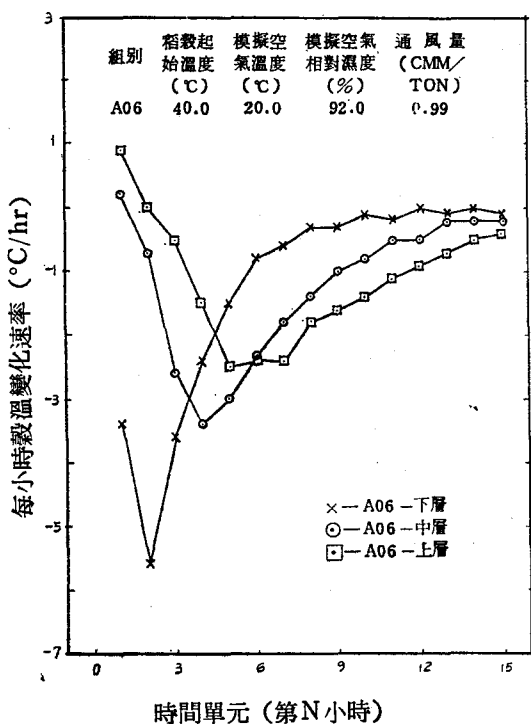


圖14 穀層位置影響通風降溫速率的關係 (A6)

要時期內的溫速率以下層最大、中層次之，而以上層最小，其原因為冷空氣經穀層往上移動時空氣溫度逐漸升高，溫度差漸小，故降溫能力漸弱。

4. 稻穀與空氣間溫差大小對通風降溫速率的影響

表5的共同趨勢指出，稻穀與空氣間溫差愈大時，平均降溫速率愈大，此乃因稻穀與空氣間溫差愈大，降溫能力愈強，茲以圖15說明如下：A29、A7與A31三組的稻穀起始溫度約同為35°C，模擬空氣相對濕度約同為85%，通風量同為0.99CMM/TON，但模擬空氣之溫度分別為32.3、26與20.2°C，亦即實驗前稻穀與空氣間溫差分別為3.4、9與14.9°C。圖15中可清楚地看出，稻穀與空氣間溫差互不相同的三組，其通風降溫的主要時期約略相同在通風後3至9小時中，且通風的降溫速率，隨著稻穀與空氣間溫差之增大而增大。其每小時之降溫速率的最大值，於溫差3.4°C時為-1°C/hr，於溫差9°C時為-1.6°C/hr，於溫差為14.9°C時為-2.6°C/hr。

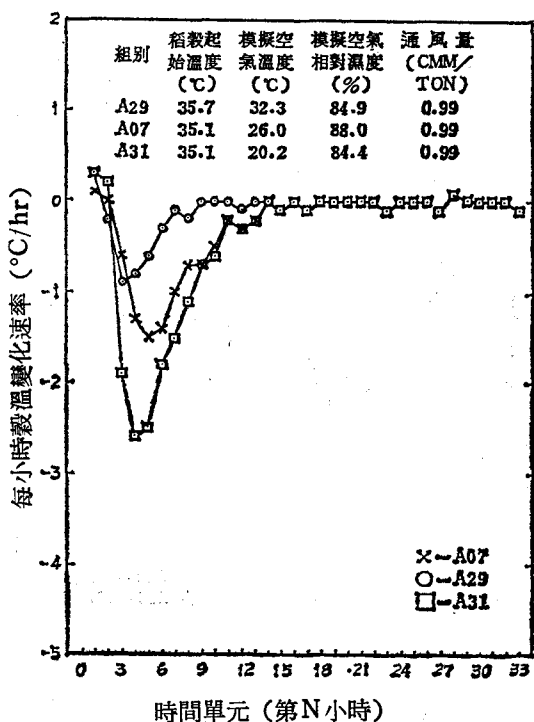


圖15 稻穀與空氣間溫差大小對通風降溫速率的影響 (A7、A29、A31)

5. 空氣相對濕度對通風降溫速率的影響

表 5 的共同趨勢指出，空氣相對濕度愈低其 CR 值愈大，因此，以相等通風量及固定的空氣溫度，對相同溫度的稻穀進行通風時，空氣相對濕度愈低者其平均降溫速率較大，而空氣相對濕度愈高者其平均降溫速率較小。此結果與 Foster⁽¹⁰⁾所指空氣相對濕度低時通風降溫速率大，反之亦反的結果相同。茲以圖16為例說明此種情形，圖中 A28 組的模擬空氣相對濕度為 65.1%，A16 組的模擬空氣相對濕度為 89.4%，兩組之共同的通風條件為稻穀起始溫度約 35°C，模擬空氣溫度 20°C，通風量 0.25CMM/TON。比較兩組在通風過程中降溫速率之結果，相對濕度為 65.1% 的降溫速率較相對濕度為 89.4% 者為大，但其差異並不大，且於通風降溫速率達最大值之後，兩者間之降溫速率即無顯著之差異，此可能是因為通風時相對濕度低者蒸發冷卻的作用顯著，而於通風降溫速率達到最大值後蒸發冷卻作用不復顯著。

6. 通風量對通風降溫速率之影響

表 5 的共同趨勢指出，通風量愈大其 CR 值愈大，因此，在相同模擬空氣狀況下對相同溫度的稻

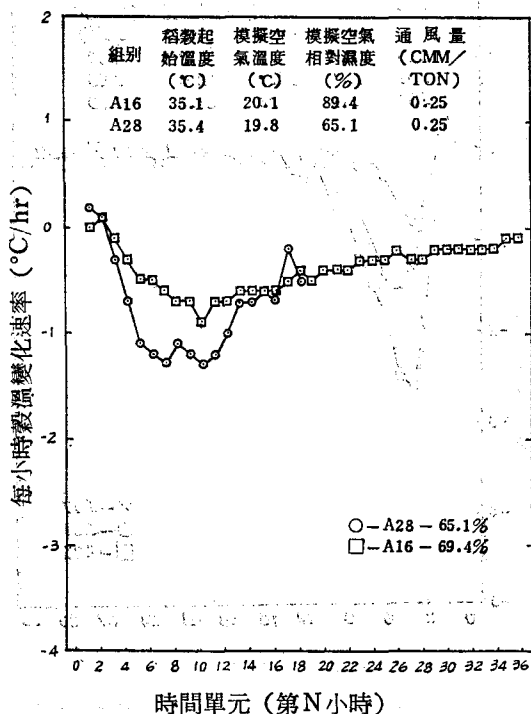


圖16 空氣相對濕度對通風降溫速率的影響 (A28、A16)

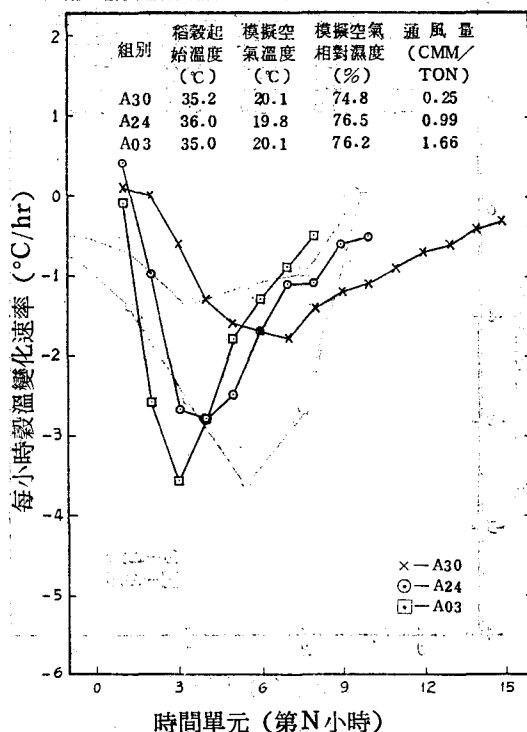


圖17 通風量影響通風降溫速率之關係 (A30、A20、A3)

穀進行通風時，通風量大者其平均降溫速率較大，而通風量小者其平均降溫速率較小，茲以圖17為例說明此種現象，圖中 A30 組的通風量為 0.25CMM/TON，A24 組的通風量為 0.99CMM/TON，A3 組的通風量為 1.66CMM/TON，此三組共同的通風條件為稻穀起始溫度約 35.4°C，模擬空氣溫度 20°C，模擬空氣相對濕度約 76%。本例中通風量為 0.25，0.99 與 1.66CMM/TON 時之最大降溫速率分別為 -1.8、-2.8 與 -3.6°C/hr，而其發生之時間分別為通風後第 7 小時、第 4 小時與第 3 小時。此結果顯示出通風過程中之最大降溫速率隨通風量之增加而增大，且最大降溫速率之發生時間隨通風量之降低有往後遞移的現象。

7. 統計逐步迴歸分析之結果

本研究以實驗數據 (表 3) 利用 STATGRAPHICS (Statistical Graphics System) 套裝軟體，於 PC/AT 上就降溫速率值進行逐步迴歸分析 (Stepwise regression)，將所有可能的自變數組合加以比較，以尋求最佳的迴歸方程式，其結果如表 7 所示。首先吾人以通風試驗全部 34 組數據加以

表 7 逐步迴歸分析之結果

迴 歸 步 數 (迴歸數據組數)	自變數	迴歸係數	標準誤差	複判定係數 R ²	S S R (SSE)	F 值
通風試驗 (CR估計值之標準誤差爲0.3830)						
3 (34)	常數項	1.1761	0.6066	0.6462	9.1505 (4.3389)	21.0896*
	R H	-0.0202	0.0076			
	A F	0.6533	0.1137			
	T D	0.0742	0.0128			
通風試驗 (CR估計值之標準誤差爲0.2522)						
3 (33)	常數項	0.5368	0.4171	0.8550	10.8759 (1.8477)	59.9930*
	R H	-0.0139	0.0051			
	A F	0.7681	0.0777			
	T D	0.0825	0.0086			

附註：SSR表迴歸平方和；SSE表誤差平方和；RH表空氣相對濕度；AF表通風量；TD表稻穀與空氣間溫差；
*表1%顯著。

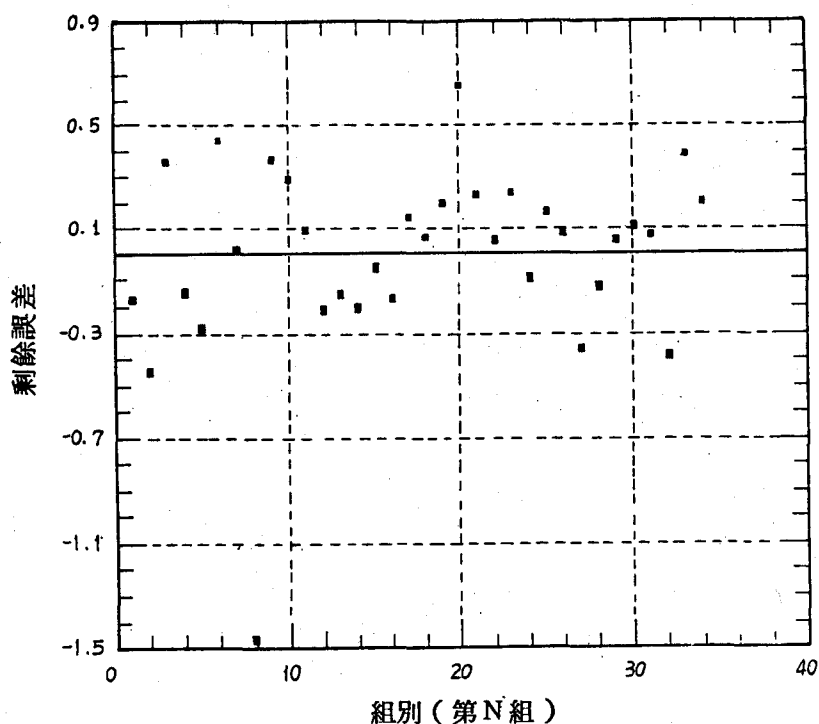


圖18 CR 值的剩餘錯誤差圖

分析,結果選定的自變數為空氣相對濕度、通風量及稻穀與空氣間溫差,但是複判定係數 (Coefficient of multiple determination) 僅 0.6462,觀察圖18知其剩餘誤差 (Residual) 於第8組 (即A8) 時幾乎高達-1.5,顯然該組數據不適合此迴歸模式,因此加以剔除而以33組數據再做一次,其結果選定的自變數相同,而複判定係數則提高至0.8550,其複迴歸方式如公式(3)所示。

$$CR=0.5368-0.0139RH+0.7681AF+0.0825TD \dots\dots\dots(3)$$

公式(3)中,CR 表通風降溫速率 (°C/hr),RH 表空氣相對濕度 (%),AF 表通風量 (CMM/TON),TD 表稻穀與空氣間溫差 (°C)。由式中得知,通風量及稻穀與空氣間溫差對通風降溫速率有正效應,且其影響程度遠比具有負效應的空氣相對濕度為大,因此,通風量及稻穀與空氣間溫差是影響稻穀倉貯通風降溫的主要因素,此更驗證了前述討論的正確性。

五、結 論

本研究在實驗室內以通風試驗槽模擬穀倉通風作業,觀察強制通風時稻穀溫度的變化,所得結論如:

1 通風時通風量及稻穀與空氣間溫差的大小是影響降溫速率的主要因素。

2 通風量大時,通風的降溫速率也大,反之亦然;而稻穀與空氣間溫差影響降溫速率的情形亦類似。相反地,空氣相對濕度愈低時,其通風降溫速率愈大,反之亦然。

3 通風後期當穀溫與空氣間溫差值減少至2~3°C左右以後,再繼續通風之效果不佳,此時應停止通風以避免無謂之電力耗費。

4 由下層進風時稻穀溫度變化由下層、中層而上層先後各有一降溫的主要時期,因此實行強制通風作業時,務必等上層稻穀經歷降溫的主要時期以後,才能確切發揮通風降溫的效果。

5 統計方法逐步迴歸分析的結果,降溫速率可被表成通風量、稻穀與空氣間溫差及空氣相對濕度的函數,其迴歸方程式如下所示,將使本研究之論點更形有力。

$$CR=0.5368-0.0139RH+0.7681AF+0.0825TD, R^2=0.8550$$

六、誌 謝

本文承蒙恩師盧福明先生的悉心指導與屢次催促改稿發表,蕭介宗教授的大力斧正,游誠一先生的協助裝設實驗設備,黃清白先生的幫助實驗與電腦繪圖,始得順利完成,謹此再致由衷之謝忱。

參 考 文 獻

- 1977-1986, 臺灣省政府農林廳, 臺灣農業年報。
- 盧福明, 李廣武, 馮丁樹, 穆克剛, 1979, 稻穀儲藏耗損及加工性能測定研究, 中國農業工程學報25(2): 40-57.
- 盧福明, 陳貽倫, 1978, 改善倉庫機械設備之研究, 中國農業工程學報24(1): 28-39.
- 盧福明, 賈金石, 侯信雄, 1977, 圓筒倉貯存稻穀之研究, 中國農業工程學報23(4): 9-23.
- 盧福明, 1981, 圓筒倉貯存稻穀之研究(II)結果報告, 中國農業工程學報27(3): 14-27.
- 張長泉, 劉廷英, 呂理焜, 1981, 稻穀袋裝及散裝貯存之品質及害蟲發生之比較, 科學發展月刊 9(7): 592-602.
- 蔡致榮, 1983, 強制通風對散裝貯藏稻穀溫度變化之影響, 國立臺灣大學農業工程學研究所機械組碩士論文。
- Calderwood, D. L. 1973. Resistance to airflow of rough, brown and milled rice. Trans. of the ASAE 16(3): 525-527, 532.
- 1978, Behlen planning manual for grain handling and storage systems. Behlen-Wickes Company Limited, Brandon, Manitoba, Canada.
- Foster, G. H., 1967. Moisture changes during aeration of grain. Trans. of ASAE 10(3): 344-347, 351.
- 1982, Agricultural Engineers Yearbook. ASAE D272. 1.
- Lu, F. M. and P. Chen, 1985. Forced aeration to control paddy temperature in warehouse. ASAE Paper 85-3553.