



# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 溫室通風動態模擬(一)

### Dynamic Modeling of Greenhouse Ventilation (I)

計畫編號：NSC 89-2313-B-002-249

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：張倉榮助理教授 台灣大學農業工程學系

計畫參與人員：郭鴻興、游家信 台灣大學農業工程學系

#### 一、中文摘要

本研究使用計算流體動力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)進行自然通風低層建築物通風效率之分析。首先，以紊流大渦模擬模式(Large Eddy Simulation, LES)配合 Navier-Stokes 控制方程式，進行 CFD 數值環境風場模式的研究發展，繼而將數值模擬結果與現有風洞實驗資料進行比對分析，以驗證數值模式之參數，其結果發現十分吻合。本研究再跟文獻中 CFD 最常見之紊流 k- $\epsilon$  模式模擬結果比較，比較結果顯示 LES 模式具有非等向性渦旋模擬之優越性，優於紊流 k- $\epsilon$  模式，尤其是在角隅及屋頂部位，k- $\epsilon$  模式所得之結果與實驗值差距更大。最後，本研究對單區間雙斜式溫室，予以通風數值模擬測定，對不同位置及角度之開口做有效性之室內通風路徑組合，嘗試以既有之溫室通風控制模式作為基礎，尋求室內通風路徑之最佳化方式，以獲得有效率、可靠的通風設計資料，並作為工程師設計參考之依據。

關鍵詞：計算流體動力學、低層建築物、通風特性、自然通風效率、紊流大渦模擬模式。

#### Abstract

A systematic analysis of the ventilation process in naturally ventilated low-rise buildings was performed with the use of computational fluid dynamics (CFD) to solve the Navier-Stokes equations together with the large eddy simulation (LES) turbulence model. The validity of the model was verified by comparing the simulated numerical results with

the published experimental data and the conventional turbulence model such as the k- $\epsilon$  model. A good agreement between the numerical data and the experimental measurements was found if a LES turbulence model is applied in CFD simulation, especially for the flow fields located in the corners and top of the buildings. Then, the influence of design characteristics, such as the opening angles and locations on the ventilation efficiency was examined in the case of a typical Venlo greenhouse, which is a representative example of naturally ventilated low-rise buildings. It is demonstrated that CFD is a powerful tool for developing improved designs with respect to ventilation efficiency.

Keywords: Computational fluid dynamics, Low-rise buildings, Ventilation characteristics, Natural ventilation rate, Large eddy simulation.

#### 二、前言

低層建築物係指樓層在三至五層以下之建築物，其廣泛存在於台灣鄉村地區及都會區邊緣地帶，類別包括有居住用建築物及農業用建築物等。相較於都會區高層辦公大樓大多屬密閉式結構，以機械通風及中央空調系統作為更新室內空氣的主要手段，低層建築物則是大多採用自然通風方式更新室內空氣，以避免室內空氣品質的惡化。近年來，由於地球環境破壞日趨嚴重，並已擴大至地球的尺度，使得人類的生存遭到嚴重的威脅，全世界正展開全面性的地球環保運動。在台灣，政府亦極力推動「綠建築」觀念，訂立以健康、生態、節約資源、減廢為最高

導向的台灣國民居住水準，建築物採用自然通風較採用機械空調系統通風更能符合綠建築「省資源、低耗能、低污染」的施行目標。因此，現階段進行低層建築物在自然通風狀況下通風特性研析，有其階段性意義。

對於研究低層建築物室內之自然通風與污染質傳輸，有巨觀之多區間氣流模式與微觀之計算流體動力學室內氣流模式。多區間氣流模式係將建築物依隔間或氣流流通方向劃分為多個獨立的室內區間，以氣流質量守恆及污染物質守恆為理論基礎，計算室內各氣流開口的平均氣流量及各區間的平均室內污染濃度值，以判定室內空氣品質；而計算流體動力學室內氣流模式則是以紊流數值模式詳細模擬室內各時間各地點之氣流場和污染濃度值，藉以判定室內空氣品質指標。這兩模式各有其長處及限制，多區間氣流模式可模擬低層建築物多室內空間之氣流流況，惟每一室內區間採平均值計算，雖方便計算卻無法精密地描述一室內空間任何角落之氣流軌跡與污染濃度。而計算流體動力學室內氣流模式之優越性為能計算室內空間詳細的紊流氣流情形，但現階段限於電腦計算能力，對多區間建築物之詳細氣流場與污染濃度場的計算仍有其困難度。對於自然通風低層建築物而言，由於溫室內採光性佳、室內外風壓差、濕氣、空氣品質之控制管理，所引起之熱浮力、風壓力、濕度、空氣品質指標，具有代表性問題需要探討，因此本研究選用單一區間之雙斜式溫室作為低層建築物之表徵，以計算流體動力學分析自然通風在溫室室內空間之通風特性，以作為溫室內之自然通風與污染傳輸計算之工具。

自 1990 年代，以計算流體動力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 分析溫室自然通風特性及預測換氣率，做為溫室流場、濕度及污染濃度評估之依據，已逐漸普遍 (Awbi, 1991; Mistriotis et al., 1997a, 1997b; Kacira et al., 1998)。以台灣夏熱冬濕之氣候，在其通風效率良好時，可防止作物礦物的流失及減少細菌之生長，亦可避免結露現象，使作物產量增加且可提昇其品質，並減少植物化學肥料的使用。對於因空氣交換率不足所產生之不良的室內空氣品質，進

而造成生物不舒適或生長遲緩之情形，由 CFD 重複分析各項造成空氣惡化之因子，以作為溫室建築設計及修改設計之參考，較風洞實驗為經濟。在室內通風之行為中以自然通風方式最為常見，經由自然通風換氣來更新溫室室內空氣，避免空氣品質惡化，由來已久。再者由室內外溫度差亦可促使室內外環境因熱浮力作用而產生氣流質量交換，但若室外空氣流速在 0.5m/s 以上時，熱浮力效應可忽略 (Mistriotis et al., 1997b)。本研究使用計算流體動力學室內氣流模式配合紊流大渦模擬模式，來分析自然通風在溫室之通風特性，其結果並與文獻之風洞實驗 (Sase et al., 1984) 資料及  $k-\varepsilon$  紊流數值模式 (Mistriotis et al., 1997a) 加以比對查驗與修正，使模擬結果更趨近於實際狀況。本研究模擬多組單區間雙斜式溫室，對不同室外風速、不同開口位置及角度做室內通風路徑組合，以尋求室內通風路徑之最佳化方式。

### 三、研究方法

若低層建築物側向流況變化甚小，則垂直平面二維之方程式可由下三式而得：

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

其中， $t$ ：為時間座標； $x$ ：為橫向座標(水平方向)； $y$ ：為縱向座標(垂直方向)； $\nu_t = \nu + \nu_{sgs}$ ：有效紊流黏滯係數； $P$ ：壓力； $\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}$ ：為沿  $x$  或  $y$  方向之偏微分運算子； $\bar{u}$ ：沿  $x$  方向之水平流速； $\bar{v}$ ：沿  $y$  方向之垂直接流速；(1)、(2)及(3)式分別表示氣流連續方程式、 $x$  及  $y$  方向運動方程式。

為使模擬結果更接近於低層建築物實際氣流場流動狀況，準確地計算通風口氣流速度，以用最傳統之一階精度之上風法及中央差分兩種混合方式對非線性之對流項進行離散處理，來進行數值模式發展。此外，為使氣流流動之邊界條件在格點上求解之時，減少引用差值方法以增進計算精度，故模式採

非交錯格網分布，即流速及壓力在同一格點上，以有限差分法將控制方程式離散後以顯式法解之，求解過程中乃採每一格點之質量守恆之差值，作為該點壓力之修正參數，直至整個流場滿足質量守恆。

#### 四、模式驗證

本研究以雙斜式溫室，作為自然通風低層建築物之開口特性數值模擬之研究案例，在模式驗證部份，以 Sase et al.(1984)之二維 1/10 縮小比例溫室模型風洞實驗結果進行模式驗證，以了解模式模擬之正確性。該風洞實驗為以指數風速分佈 2.0m/s 垂直的吹向單跨度溫室屋脊，其屋頂、邊牆有通風口，縱向沿屋脊延伸且連續，屋脊高 3.5M、導水溝高 1.7 M、寬 6.5 M、屋頂及邊牆窗淨高 0.7 M 下，其邊窗旋轉點高為 1.17 M，雷諾數為  $4.7 \times 10^4$ 。

在等溫條件下 Sase et al. (1984)使用二維熱線風力計和煙流量測氣流場。在相同溫室參數條件下，本 LES 模式模擬之速度向量場與流線場顯示，一強勁氣流自邊窗 1 流入，沿著室內屋頂產生抖動及小渦漩向天窗 3 流出約 60% 氣流量；第二個相當清晰的強勁循環氣流順著室內形狀往邊窗 4 流出約 40% 氣流量，另一部份亦在窗台後形成渦漩約 1/3 溫室高，於循環氣流中也出現溫室空間混合空氣氣流，最後在兩天窗間(屋脊)出現一渦漩及背風面屋頂之外部表面出現一大渦漩。此外，溫室內水平地面上方 1.5 公尺處風洞實驗與 LES 數值模式之風速比較，其相對誤差約在 10% 以內，故數值模擬結果與風洞試驗十分吻合。

#### 五、模擬結果與討論

本研究模仿台灣夏季之氣候條件，其風場溫度  $33^{\circ}\text{C}$ ，風場相對濕度 75%。數值模式計算範圍以 8h 高、15h 長( $h=3.5\text{m}$  為雙斜式溫室之高度)為風場模擬範圍，在室內外均簡化為無干擾物及室內隔間，模擬邊界上游距離主建築物約 2h，(因迎風面邊牆僅高 1.7m，下切氣流受迎風水平氣流影響而不明顯，予以縮短)，模擬邊界下游離主建築物約

11h。

數值模式使用的格網由最密至最疏為  $10\text{cm} \times 20\text{cm}$ ， $10\text{cm} \times 50\text{cm}$ ， $50\text{cm} \times 20\text{cm}$ ， $50\text{cm} \times 50\text{cm}$  等四個區域，其可變正交格網在溫室所在區域以最密格網進行計算，以得到最精密的計算結果，而其它三個區域採較疏格網，但格網點距離亦有所限制，以避免數值不穩定而造成誤差擴大。在本研究，總格網點數在 20000 點以內，如此可不失準確性並可節省數值計算時間。

##### 1. 風經過二維低層建築物之室內環境流場

本模式再跟文獻中 CFD 之  $k-\varepsilon$  模式在相同狀況下所模擬的雙斜式溫室結果進行比較(Mistriotis et al., 1997a)。 $k-\varepsilon$  模式所模擬之結果雖在室內有渦漩氣流產生，但背風面屋頂之外部表面無渦漩現象，故無法準確地描述紊流軌跡。比較圖三及圖四可知，本 LES 模式所模擬而得的結果在背風面屋頂及角隅處均有渦漩氣流產生，且與風洞實驗值相當接近。因此，綜合以上各圖可知，本 LES 模式模擬結果均優於  $k-\varepsilon$  模式，顯示 LES 模式具有非等向性渦漩模擬之優越性。

##### 2. 自然通風效率--空氣交換率結果分析

雙斜式溫室在迎風面邊窗開口角度、天窗開口、背風面邊窗開口角度及入流風速變化下之空氣交換率，如表一至表四共分成四組，在表中第一組 A 型即簡寫為「1A」，之後所述為該型簡稱。而各組依本 CFD 數值模式所模擬而得之空氣交換效率(Air Change per Minute, A.C.  $\text{min}^{-1}$ )則如表五至表八所示，空氣交換效率之計算係將建築物總入流量(或出流量)除上室內單位長度之體積，代表單位時間內外氣氣流所交換的室內空間體積，空氣交換效率值愈高表示自然通風效率愈好。同時本研究進一步分析各組之每一開口，在不同指數風速分佈作用下氣流體積流通量及其速度向量場與流線場，因限於章節篇幅，僅將第一組模擬結果示出。

第一組模擬結果顯示，1A 迎風面邊旋轉窗關閉，主要氣流入天窗 2，隨即自天窗 3 流出，少部份氣流約 15% 往邊窗 4 流出，並在溫室內形成大渦漩。雖 A.C. 為  $1.84 \text{ min}^{-1}$ ，然而大部份氣流僅在天窗附近交換，使溫室內空氣滯留時間變長且少量往邊窗 4 流出，

故實際影響溫室室內通風僅為  $0.28 \text{ min}^{-1}$ 。1B 迎風面邊旋轉窗開  $45^\circ$ ，主要氣流流入邊窗 1，在窗台後形成渦漩約溫室之  $1/3$  高，其上氣流一部份往邊窗 4 流出，另一部份上流往天窗 3 流出。1C 迎風面邊旋轉窗開  $90^\circ$ ，主要氣流流入邊窗 1，約為 1B 邊窗 1 之 2 倍，在窗台後形成渦漩約溫室  $1/3$  高，迎風面天花板下亦形成渦漩，其上氣流一部份往邊窗 4 流出，另一部份上流往天窗 3 流出。

2A 迎風面邊旋轉窗開  $45^\circ$ ，主要氣流流入邊窗 1，在窗台後形成小渦漩，而邊窗 4 關閉致使順流而上往天窗 3 流出有 50%，當愈靠近邊窗 4 時，則有死域形成，讓溫室內空氣停留時間變長，即使忽略天窗 2 入流量其實際空氣交換率僅為  $1.07$  及  $0.62 \text{ min}^{-1}$ 。2B 之溫室室內通風物理情況同 1B。最後，2C 迎風面邊旋轉窗開  $45^\circ$ ，主要氣流入邊窗 1，在窗台後形成小渦漩，但 2C 之空氣交換率較 2B 為佳。

3A 迎風面邊旋轉窗開  $45^\circ$ ，主要氣流流入邊窗 1，在窗台後形成大渦漩，其主要氣流往邊窗 3 流出(約 80%)，另一部份氣流往邊窗 4 流出。3B 迎風面邊旋轉窗開  $45^\circ$ ，主要氣流流入邊窗 1，在窗台後形成小渦漩，又因氣流流入邊窗 2，使得迎風面天花板下有較大紊流產生。3B 型之 A.C. 為  $2.05 \text{ min}^{-1}$  較佳，惟當指數風速分佈為  $1.0 \text{ m/s}$  時，則 3A 與 3B 兩型之 A.C. 為  $0.89$  及  $0.86 \text{ min}^{-1}$  甚為接近，表示在低入流風速時，開啟迎風面或背風面天窗的差別並不大。

4A 迎風面、背風面邊旋轉窗關閉，主要氣流流入天窗 2，隨即自天窗 3 流出，少部份氣流約 8% 流入溫室內。並在溫室內形成大渦漩，影響溫室室內通風而使得實際 A.C. 僅  $0.14$  及  $0.04 \text{ min}^{-1}$ 。4B 迎風面邊旋轉窗開  $45^\circ$ ，主要氣流流入邊窗 1，在窗台後形成小渦漩，又在迎風面天花板下有較小渦漩產生；因天窗全關閉，故氣流由邊窗 4 流出，其 A.C. 為  $1.35$  及  $0.62 \text{ min}^{-1}$ 。

## 六、結論

1. 本研究以數值模擬結果比較風洞實驗資

料，結果發現以 LES 紊流模式具非等向性渦漩，優於紊流  $k-\varepsilon$  模式。另外，在角隅或屋頂部位， $k-\varepsilon$  模式所得之結果與實驗值差距更大。

2. 第一組至第四組自然通風效率綜合結果以 1C 型之 A.C. =  $4.16 \text{ min}^{-1}$  最佳，4A 型效果最差 A.C. =  $0.14 \text{ min}^{-1}$  (邊窗 1 關閉)，故迎風面開口之有效性對室內通風效率好壞，具有重要影響。
3. 從 4A 型、4B 型加以比較，發現 A 型僅開啟迎風面天窗，B 型僅開迎風面邊窗，在不同入流風速條件下，4B 型空氣交換率為  $1.35$  及  $0.62 \text{ min}^{-1}$ ，約為 4A 型  $0.14$  及  $0.04 \text{ min}^{-1}$  之 10 倍，顯示控制室內大多數通風體積的邊窗對室內通風效率的重要性。

## 七、參考文獻

1. Awbi, H. B., (1991), *Ventilation in Buildings*, E and FN Spon, London, UK.
2. Kacira, M., Short, T. H., and Stowell, R. R., (1998), "A CFD Evaluation of Naturally Ventilated, Multi-span, Sawtooth Greenhouses," *Trans. ASAE*, 41(3), 833-836.
3. Mistriotis, A., Bot, G.P.A., Picuno, P., and Scarascia-Mugnozza, G., (1997a), "Analysis of the Efficiency of Greenhouse Ventilation Using Computational Fluid Dynamics," *Agricultural and Forest Meteorology*, 85, 217-228.
4. Mistriotis, A., Arcidiacono, C., Picuno, P., Bot, G.P.A., and Scarascia-Mugnozza, G., (1997b), "Computational Analysis of Ventilation in Greenhouses at Zero-and Low-wind-speeds," *Agricultural and Forest Meteorology*, 88, 121-135.
5. Sase, S., Takakura, T., and Nara, M., (1984), "Wind Tunnel Testing on Airflow and Temperature Distribution of a Naturally Ventilation Greenhouse," *Acta Horticulturae*, 148(1), 329-336.