

災害防救學報（民國九十七年九月）  
第九卷第一期 第 63~81 頁  
Journal of Disaster Mitigation and Rescue (Sep. 2008)  
Vol.9, No.1, pp.63~81

# 閃燃模式與數值模擬應用於 單房火災閃燃現象之探討

## Application of Field Model and Flashover Models to Flashover Fire in a Full-scale Single Room

林誠興<sup>\*</sup> 王士承<sup>\*\*</sup>

Cherng-Shing Lin Shih-Cheng Wang

### 目 次

壹、介紹	伍、數值模型之建構
貳、數值模擬軟體簡介	陸、結果與討論
參、閃燃模式簡介	柒、結論
肆、NIST 全尺寸寢室火災實驗說明	

關鍵詞：火災、濃煙、數值分析、閃燃

\*林誠興，元智大學機械工程系教授。

\*\*王士承，元智大學機研所博士生。



## 摘要

建築物火災發生閃燃現象時，將產生全面性燃燒，並嚴重損壞火場建築物及危害人員安全。如能預測火場發生閃燃的時間，進而有效的控制與防範，可大幅提升建築物防火性能。本文以 NIST(National Institute of Standards and Technology)全尺寸寢室火災實驗配合場模式 PHOENICS 軟體之模擬數據，利用閃燃理論模式來估算閃燃時間，並與 CFAST(Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport)軟體與閃燃估算式所求得之閃燃時間相比較，評估不同閃燃估算模式與實驗量測其閃燃時間之差異。

## Abstract

Flashover is an important phenomenon whereby a compartment fire undergoes a rapid growth in size and intensity. It often causes a huge damage to the building and human casualties in a fire scene. Therefore, flashover occurring time prediction, its effective control and prevention are extremely important for promoting the building fires' protection capability. This study uses a full-scale compartment fire test derived from National Institute of Standards and Technology (NIST) and combines the PHOENICS field simulation software with the available empirical correlations to predict the flashover occurring time. The simulation results have been compared with the Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (CFAST) model to verify the flashover time between simulation models and experimental measurements.

**Keywords :** *fire, smoke, numerical analyses, flashover*



## 壹、介紹

建築物火災閃燃(Flashover)現象的發生除了會造成火勢迅速擴大外，大火亦可能波及鄰近區域或樓層，而閃燃發生時間對人員可容許的逃生時間亦是一個非常重要的指標。因此，不論在防火、避難上，火場發生閃燃時間的控制與預測都具有重大意義。

閃燃現象為火場在通風良好的情況下，易燃物受熱分解燃燒後產生高溫的可燃性氣體持續在天花板處堆積，且輻射熱能持續傳遞至其它易燃物，造成其它易燃物表面溫度持續升高，達燃點時便開始起火燃燒。由於室內許多易燃物是同時受熱，當有易燃物被引燃時，其附近易燃物也易迅速達到燃點，經由這樣的連鎖反應後將使火勢一舉往室外竄出，此一情境即為閃燃現象。

閃燃現象是發生在火勢成長期，閃燃發生的機率主要與建築物內部區間大小、易燃物的種類、開口率及室內裝潢等因素有關，當建築物發生閃燃現象後，火勢即進入完全發展期。現代建築物室內裝潢、傢俱物品大都為易燃材質，且燃燒後易產生有毒煙氣，對人員避難逃生已是一大隱憂，而當火場有閃燃現象發生時，易造成室內溫度急劇上升，氧氣迅速耗盡，此時室內人員均已無法生存，所以人員必須在此一時期前逃生至安全區域。

預測單房火災發生閃燃的模式相當多，一般都是利用質量、能量平衡的方式來探討，或以模擬、實驗的方法找出預測閃燃之估算式。由於閃燃現象發生後會造成區間內溫度急劇上升，因此已有學者利用熱平衡的方式推導出無因次溫度方程式，以求得熱煙層溫度隨時間之變化，並探討牆在不同熱慣性下與撒水量對閃燃現象之影響[1-3]。實驗是研究火災最直接有效的方法，如能確定燃料種類、燃料的位置和內部材質，就可利用小尺寸燃燒測試來預測實際火災發生閃燃現象[4]。在理論與實驗比較方面，[5]以ASTM(American Society for Testing and Materials)STP(Special Technical Publication) 882小尺寸( $0.4m^3$ )實驗資料與 Bishop 等人之閃燃理論做比較，比對結果有相當不錯的吻合度，尤其是閃燃發生的時段。由實驗得知，閃燃發生的條件為上層氣層溫度達  $600^\circ\text{C}$  以上、至地板的熱通量達  $20\text{kw/m}^2$  以上、火勢由開口處竄出，而理論所得之估算式均與通風因子(Ventilation factor)有關，[6]分別探討開口大小與牆的性質對閃燃之影響，並與 CFAST 軟體、MQH(McCaffrey, Quintiere, Harkleroad)之估算式做比較。另外亦有研究人員利用實驗數據來探討閃燃現象，利用最小平方差的方式計算出實驗區間上層溫度上升之二維曲線，並對地板有無熱傳、不同通風因子、房間大小、壁材等變化對閃燃影響做一探討[7]。[8]以上層溫度與火源半徑變化做為閃燃發生之判斷式，當判斷式大於 0 時為不穩定的情況，可視為有閃燃發生。當閃燃現象發生時，火場內溫度梯度相當大，[9]以門的開關、

有無閃燃發生兩個實驗的數據，提供兩種溫度斜率檢驗方式來說明閃燃發生的時段。火場熱輻射效應對於閃燃發生時段相當重要，而區間開口、煙微粒的容積分量、壁面的熱傳係數等對於空間中溫度的上升與閃燃現象均有重大影響[10]。

本文利用場模式 PHOENICS 軟體分析 NIST 全尺寸寢室火災實驗，將模擬數據做為閃燃理論估算閃燃時間之參考值，並與區域模式 CFSAT 模擬結果和其它估算模式相比較，以了解不同閃燃估算模式與實驗結果之差異。

## 貳、數值模擬軟體簡介

### 一、CFAST

CFAST 為美國國家標準局暨技術協會火災實驗室所研發之火災區域模式分析軟體。區域模式是由許多空間組成，一般是分為上、下兩區域，假設每個區域的物理性質和化學性質均勻，上層區間為高溫熱層，下層區間為低溫冷層，由質量、能量守恆推導出一組全微分方程式，而彼此上、下層能量、質量會因為火源所產生的氣柱進行交換。各區域能量的傳遞是以控制容積(Control volume)來計算，所以只能得知區域與區域之間能量進出的情形，無法得知區域內部的詳細變化。雖然區域模式簡化許多參數，使得模擬結果的誤差較場模式高，但有大量實驗數據來輔助，且模式計算方式與建立較簡便，所需模擬時間較短，對於一般建築物防火安全初步評估可節省很多時間，區域內變數計算結果均為平均值，可做為預測火場煙流分佈趨勢之依據。而在版本不斷更新下，其操作界面與使用的效率及彈性比過去傳統模擬更便利。

CFAST 可設定水平與垂直開口，其水平開口可設定隨時間開啓或關閉，可當做門、窗開關的情形。其天花板、地板、牆等材質可隨著不同區域而改變，室內空調、排煙設備、消防設備（如撒水器、溫感測器）等軟體內均有提供設定。另有提供一些簡便迅速的預測工具，如逃生時間、撒水器和感測器的反應時間、天花板噴流溫度等。此軟體可計算區間內上下層溫度、氣層高度、壓力、各種氣體濃度（CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HCL 等）、開口間的質量流率等，並可顯示各區域參數平均動態變化。

### 二、PHOENICS

PHONEICS 套裝軟體是以 1980 年的 SIMPLE 法作為計算基礎，主要以 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)的計算方式求解。PHOENICS 從 1981 年發展至今已是相當成熟的 CFD 軟體，對於一般冷、熱流場之估算已行之有年，且使用的便利性與



彈性也逐年調整。為了能更接近人性化之設定，PHOENICS 於 2001 年加入 IN-FORM 介面，可將自行輸入資訊與計算模組結合，使得參數設定、求解方式的修改、模擬結果的呈現更加容易。因可外掛自寫程式，因此可模擬更為複雜且符合實際結果的流場情境，所以本文採用 PHOENICS 軟體作為閃燃預測模式計算之輔助工具。

## 參、閃燃模式簡介

### 一、Graham [1, 2]

以能量守衡方程式來推導，其熱平衡方程式為：

$$mc_p \frac{dT}{dt} = \dot{G} - \dot{L} \quad (1)$$

$\dot{G}$  是在熱氣層中淨熱增率， $\dot{L}$  是在熱氣層中淨熱損率，分別為

$$\dot{G} = \chi \Delta h_c \frac{A_f}{\Delta h_{vap}} [q'' + \alpha_u(T) \sigma (T^4 - T_0^4)] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{L} = & m_{out} c_p (T - T_0) (1 - D) + [A_u - (1 - D) A_v] h_c (T - T_w) \\ & + (1 - D) A_v h_v (T - T_0) + \alpha_g \sigma [A_u - (1 - D) A_v] (T^4 - T_w^4) \\ & + \alpha_g \sigma [A_L + (1 - D) A_v - A_f] (T^4 - T_0^4) + \alpha_g \sigma A_f (T^4 - T_f^4) \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$m_{out} = \frac{2}{3} c_d \rho_0 A_v \sqrt{2gH_v' \frac{T_0}{T} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}$$

方程式(3)包含六項物理現象，第一項為經由開口流出之焓，第二、三項分別為熱氣層週圍牆和開口之對流熱損失。最後三項分別為熱層區域至熱牆表面、冷層區域、開口和燃料基部之輻射熱傳。

參數 D 的變化值為 0 至 1，在此我們將假設 D 為常數。此外將第一項溫度  $(T - T_0)^{3/2} / TT_0^{1/2}$  以線性相依  $(T - T_0) / 2T_0$  來代替，在線性熱損失的情況下仍可有適當的精確度。最後將方程式以無因次的時間與溫度表示：



$$\tau = t / t_*, \theta = T / T_0, t_* = mc_p T_0 / Q_0, Q_0 = \chi \Delta h_c q'' A_f / \Delta h_{vap}$$

將上列方程式代入，可得

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{d\tau} = & 1 + (\varepsilon_K - \varepsilon_{R,L})(\theta^4 - 1) - \varepsilon_{C,H}(\theta - \theta_w) - \varepsilon_{out}(\theta - 1) \\ & - \varepsilon_{C,L}(\theta - 1) - \varepsilon_{R,W}(\theta^4 - \theta_w^4) - \varepsilon_{R,f}(\theta^4 - \theta_f^4) \end{aligned} \quad (4)$$

各物理參數如表 1 之說明。

假設  $\varepsilon_{R,f}(\theta^4 - \theta_f^4) \approx \varepsilon_{R,f}(\theta^4 - 1)$ ，並將上層牆之溫度轉換成

$\theta_w = 1 + \beta(\theta - 1)$ ,  $0 \leq \beta \leq 1$ ，然後可得下列式子：

$$\frac{d\theta}{d\tau} = 1 + a_1(\theta^4 - 1) - a_2(\theta - 1) + a_3\theta^3 + a_4\theta^2 \quad (5)$$

其中

$$d\tau = a_0 d\tau'$$

$$a_0 = 1 + 2\beta^2(1 - \beta)(\beta - 3)\varepsilon_{R,W}$$

$$a_1 = [\varepsilon_K - \varepsilon_{R,L} - \varepsilon_{R,f} - (1 - \beta^4)\varepsilon_{R,W}] / a_0$$

$$a_2 = [\varepsilon_{C,H}(1 - \beta) + \varepsilon_{C,L} + \varepsilon_{out} - 4\beta(1 - \beta)^3\varepsilon_{R,W}] / a_0$$

$$a_3 = 4\beta^3(1 - \beta)\varepsilon_{R,W} / a_0$$

$$a_4 = 6\beta^2(1 - \beta)^2\varepsilon_{R,W} / a_0$$

閃燃之臨界條件為  $G(T_*) = L(T_*)$  或  $G'(T_*) = L'(T_*)$ ，在熱增益曲線  $G$  與熱損失曲線  $L$  交錯之處為似穩態之情況。一般來說，求解平衡條件最多只有三種（如圖 1 虛線的部份，此圖在典型的熱擴散理論中我們稱為 Semenov's diagram），但是中間的解為非穩態，



且任何微小的變動都可能使溫度有很大的改變。 $\dot{G}$ 、 $\dot{L}$ 曲線交錯之相對位置會隨著不同的熱釋放率、開口的大小、初始溫度、牆壁溫度、對流熱傳係數等而改變。在圖 1 中，P 點會往高溫的方向移動，直到在  $P^*$  的位置(為  $G$  曲線與  $L$  曲線相切之交點)，隨後溫度迅速增加。斜率為正，表示火勢會擴大，斜率為負，表示火勢開始衰退。

表 1 無因次熱傳項目說明表

Parameter	Means
$\varepsilon_K = \left( \chi \frac{\Delta h_c}{\Delta h_{vap}} \right) \alpha_u \sigma A_f T_0^4 / Q_0$	Radiation enhancement of fire burning rate
$\varepsilon_{out} = \frac{1}{3} c_d \rho_0 \sqrt{2gH'} (1-D) A_v C_p T_0 / Q_0$	Enthalpy flow out of the vent of the compartment
$\varepsilon_{C,H} = [A_u + (1-D)A_v] h_c T_0 / Q_0$	Heat convected from the hot layer to the wall surfaces
$\varepsilon_{C,L} = (1-D)A_v h_v T_0 / Q_0$	Heat convected from the hot layer to the vent surface
$\varepsilon_{R,L} = \alpha_g \sigma [A_L + (1-D)A_v - A_f] T_0^4 / Q_0$	Radiative heat transfer from the hot zone to the lower zone
$\varepsilon_{R,W} = \alpha_g \sigma [A_u - (1-D)A_v] T_0^4 / Q_0$	Radiative heat transfer from the hot zone to the hot walls
$\varepsilon_{R,f} = \alpha_g \sigma A_f T_0^4 / Q_0$	Radiative heat transfer from the hot zone to the fire bed
$\theta_i = T_i / T_0$	Initial temperature of dimensionless

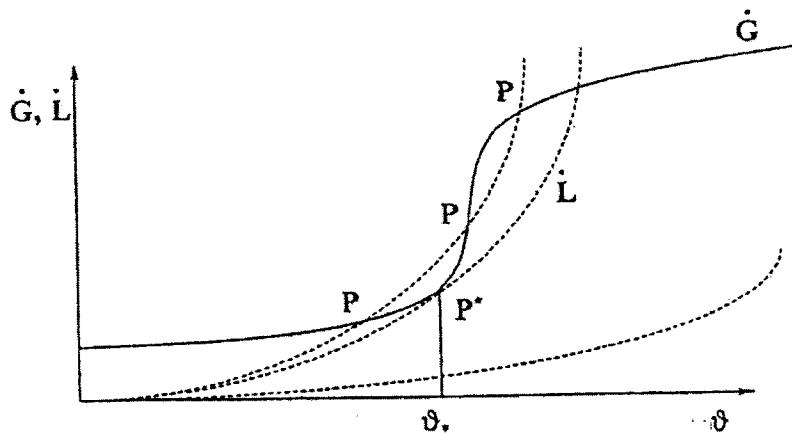


圖 1 Semenov's diagram



## 二、Babrauskas [11]

提供在密閉狀況下，假設牆為石膏板、環境溫度為 25°C，則發生閃燃之最小熱釋放率為：

$$\frac{600 - 25}{1725 - 25} = 0.83 \left( 1 + 0.51 \ln \frac{Q}{1520 A \sqrt{h}} \right) \left( 1 - 0.94 \exp \left( -33 \left( \frac{A \sqrt{h}}{A_T} \right)^{2/3} \right) \right) \\ \times \left( 1 - 0.92 \exp \left( -11.9 \left( \frac{A \sqrt{h}}{A_T} \right)^{0.6} \right) \right) \quad (6)$$

## 三、Hägglund [12]

利用兩層區域模式模擬推導，並將 Babrauskas 與其它閃燃預測模組結合而得發生閃燃之最小熱釋放率為：

$$Q = 1050 A_T \left( \frac{1.2}{A_T / A \sqrt{h}} + 0.247 \right)^3 \quad (7)$$

## 四、MQH [7]

提供預測上層氣體溫度之估算式，利用二維無因次的方式定量分析 100 多個實驗資料所找出之估算式為：

$$Q = \left( \sqrt{g} C_p \rho_0 T_0^2 \left( \frac{\Delta T}{480} \right)^3 \right)^{1/2} \left( h_k A_T A \sqrt{h} \right)^{1/2} \quad (8)$$

## 五、Thomas [13]

利用能量平衡的方式求得閃燃之估算式，方程式包含熱損失至區間表面和經由開口流至外界之焓，常數值是由實驗所得，其閃燃估算式為：

$$Q = 7.8 A_T + 378 A \sqrt{h} \quad (9)$$



由以上閃燃估算式可得知  $A\sqrt{h}$  的大小與火場發生閃燃最小之熱釋率有一比例關係，不同模式有不同的次方比例 (Power law)。方程式(6)、(7)、(9)主要是以房間幾何大小和開口大小推導出估算式，以預測發生閃燃所需最小之熱釋率，因方程式已將其它閃燃相關參數以模擬或實驗的方式求得常數項和次方比例，較適用於探討幾何形狀和開口變化時對閃燃時間的影響。而 CFAST 和方程式(5)、(8)可改變房間壁材熱傳、熱對流係數等參數的特性，對閃燃時間的預測可有較深入的探討，但相對參數輸入之數值需要有更明確的定義與限制。

## 肆、NIST 全尺寸寢室火災實驗說明

本文以 NIST 火災測試資料庫之全尺寸寢室燃燒測試編號 R1 之實驗，做為寢室火災實驗模擬對象，其測試環境條件說明如表 2。測試房間為單房，與排放收集器相連接，其幾何形狀大小之上視圖與前視圖如圖 2、3。在上視圖中編號 1~10 分別為各探測器擺放之位置，偵測項目包括溫度、壓力、氣流流速、CO 濃度、熱通量、撒水及煙感設備作動情形等。圖 4 為測試房間內部實際狀況，起火源是位在床與桌子之間。測試房間內各易燃材質之位置及尺寸大小如圖 5，主要包含床、床頭板、桌子及起火物品等四項，而門的大小為寬 0.76m、高 2.03m。其火場測得之熱釋放率(HRR : Heat Release Rate)如圖 6[14]。

表 2 測試房間環境說明

編號	家俱	壁材**	測試時間 (s)	溫度 (°C)	相對濕度 (%)	閃燃時間 (s)
R1	標準設置*	12.7mm 石膏板	1800	23	50	233

\*標準設置包括一張雙人床、一個木製的頭板、一個木製的桌子，用一個廢紙簍裝滿雜物，並放至床與桌子之間，當作起火源。

\*\*天花板的材質是 15.9mm 厚的耐火石膏板。



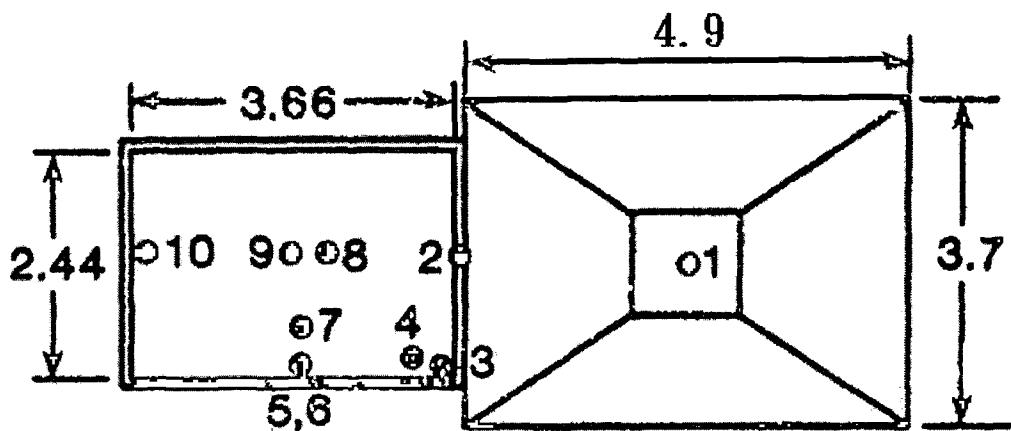


圖 2 測試房間與排放收集器之上視圖<sup>[14]</sup>

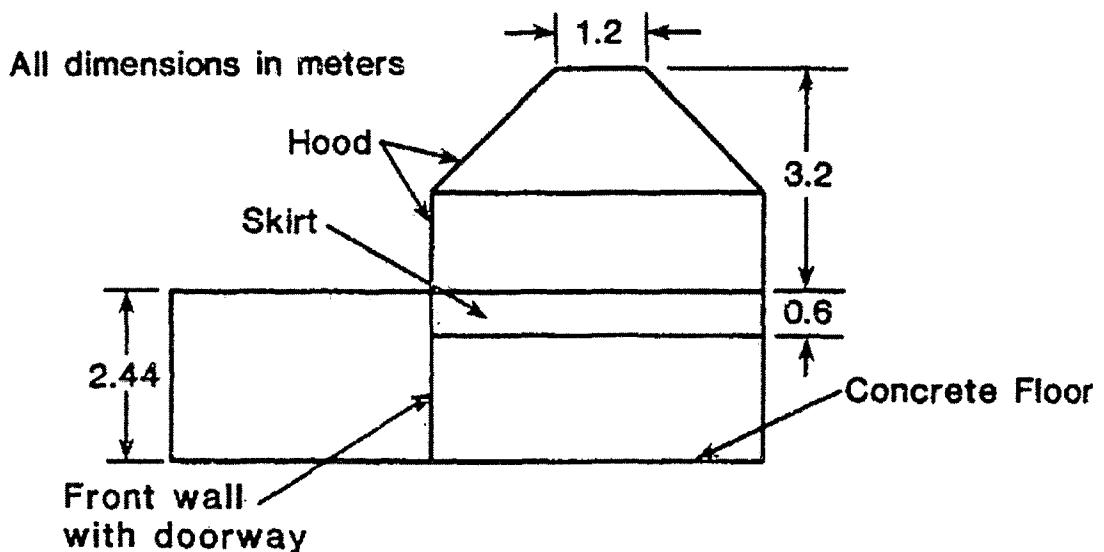


圖 3 測試房間與排放收集器之前視圖<sup>[14]</sup>

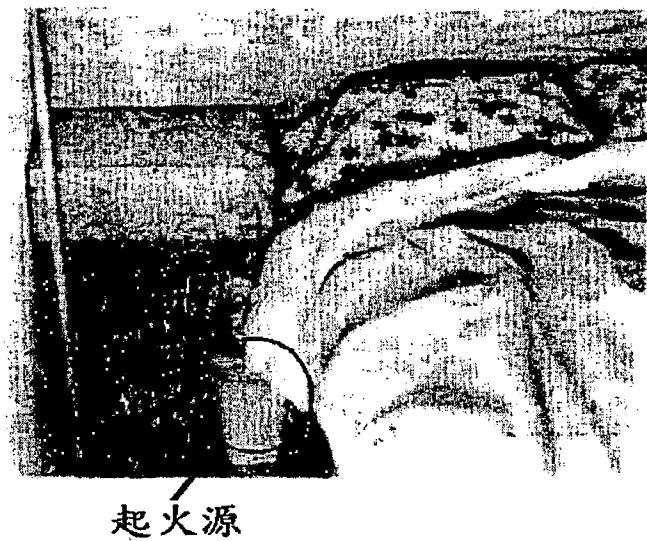


圖 4 測試房間起火源之位置圖<sup>[14]</sup>

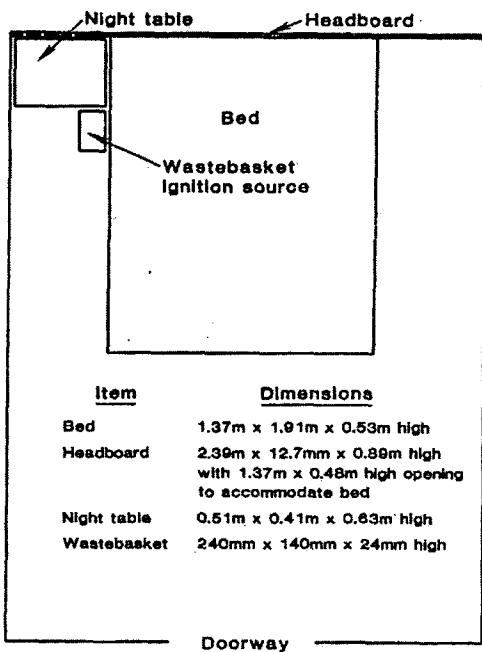


圖 5 測試房間之易燃物幾何大小示意圖<sup>[14]</sup>

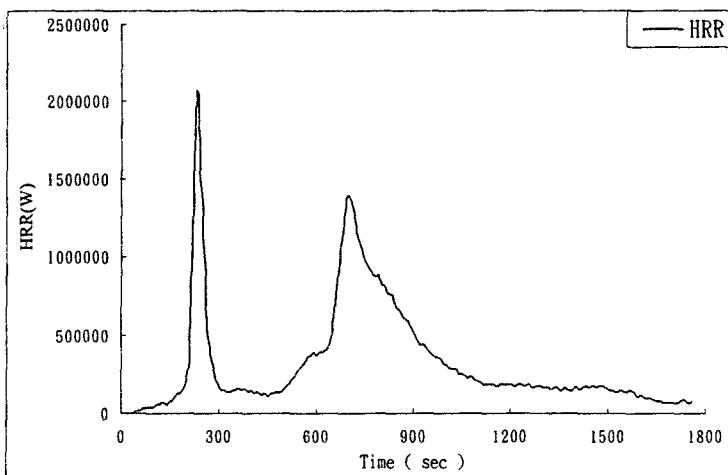


圖 6 測試房間熱釋放率分佈圖

## 伍、數值模型之建構

### 一、PHOENICS

首先整理實驗可輸入至軟體之相關資料，數值模型建構之 3D 示意圖如圖 7，邊界條件設定如表 3。為了能與實驗狀況相符，在模擬 200~230 秒時主要是接續 200 秒時之模擬資料，並設定床、桌子兩個火源，以近似實驗測試情形。由實驗得知閃燃發生時間為 233 秒，而實驗量測之熱釋放率最大值在 230 秒，因此總模擬時間為 230 秒。

本文以格點  $60 \times 35 \times 36$ 、 $67 \times 39 \times 36$ 、 $67 \times 43 \times 39$  三種格點數來做格點獨立性分析，以了解在不同格點數下模擬數據的穩定度，主要分析暫態 200 秒時主火源上方煙濃度之變化，由圖 8 可看出不同格點數下火源上方煙濃度變動趨勢仍相當近似，隨著格點數的增加，彼此的差異性逐漸縮小，在精確度與模擬分析速度的考量下，本文模擬整個實驗區間之格點數為  $67 \times 39 \times 36$ ，在排放收集器之區域給予較疏的格點密度。



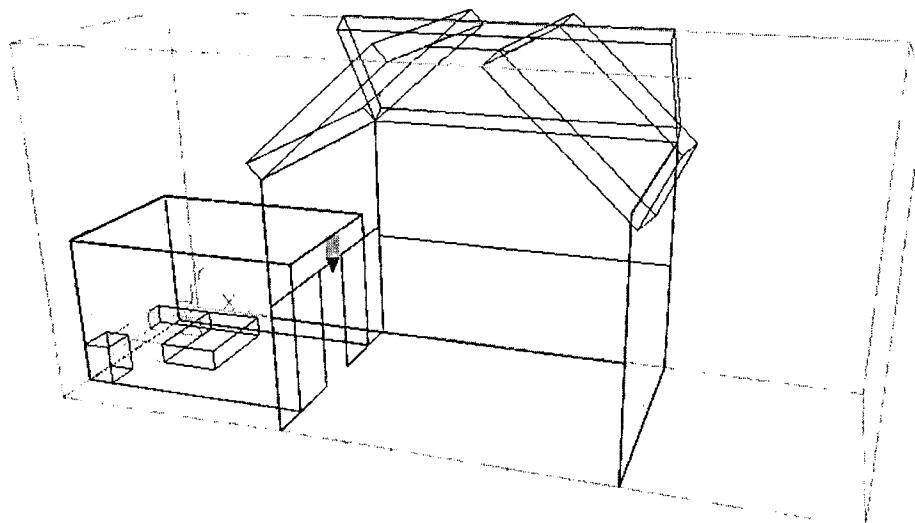


圖 7 場模型建構之 3D 示意圖

表 3 物理參數及邊界條件設置說明表

幾何大小	x:11.63m, y:5.655m, z:3.7m
壁材	天花板：具有火阻之石膏板(15.9mm) 牆：石膏板 (12.7mm) (密度:790kg/m <sup>3</sup> ,熱傳導係數:0.16W/m K ,比熱:900J/kg K) 地板：混凝土
門	W:0.76m, H:2.03m
模擬時間	230 秒
初始溫度	23°C(296K)
疊代次數	1000
格點數	67x39x36
紊流模式	k- ε 模式
空氣	使用理想氣體定律
密度	1.16kg/m <sup>3</sup>
參考壓力	1×10 <sup>5</sup> Pa
收斂條件	1×10 <sup>-2</sup>
時間間隔	0~200 秒時間間隔為 20 秒，200~230 時間間隔為 10 秒

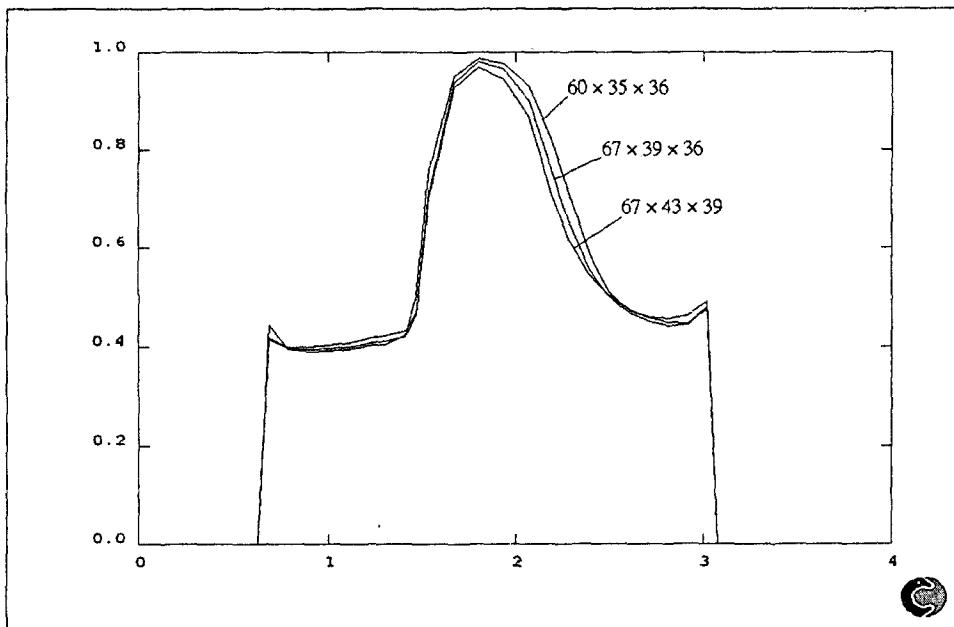


圖 8 煙濃度場格點獨立性測試

## 二、CFAST

首先將實驗量測之燒燃熱及熱釋放率輸入至 CFAST 軟體中，由於我們只探討測試房間內發生閃燃之情形，因此只設定測試房間做模擬，內部空間大小為  $2.44\text{m} \times 3.66\text{m} \times 2.44\text{m}$ ，門口大小為  $0.76\text{m} \times 2.03\text{m}$ ，天花板及牆均為石膏板材質，地板為混凝土，模擬時間 230 秒。

## 陸、結果與討論

本文以暫態 200 秒模擬結果(如圖 9、10)來說明整個實驗模擬情境。當起火源引燃床後，大火逐漸開始發展，不久延燒到在一旁的桌子，由於區間上層壓力較高，以致流進區間氣流方向為逐漸往地板處接近，當接近火源時，受到熱浮效應的影響，氣流被大量牽引至天花板，高溫氣流延著天花板迅速往門口移動，碰到門頂上端之牆壁後，氣流開始往門口移動，並快速的流竄至一旁的排放收集器，而新鮮的空氣一直不斷由排放收集器下方往區間門口下半部補充，至 200 秒時上層區間溫度已達 440K 以上，但在接近地板處之區間溫度仍為常溫。在門口離地板 1.8m 處從區間流出速度高達  $2.637\text{m/s}$ ，而在 0.3m

處往區間內流竄之速度為  $1.186\text{m/s}$ ，此時火勢開始急劇上升，至 230 秒左右有已大火往排放收集器竄出，發生閃燃現象。

為了確認實驗區間模擬數據的精確度，本文將實驗門口所量測速度與模擬結果做一比對，經由不斷模擬測試，使其模擬與實驗數值比較誤差儘量在正負 10%以內，比較結果如圖 11。由圖形可看出在不同時段下，實驗之上層速度與模擬曲線誤差均在正負 10%以內，而下層在離地板  $0.8\text{m}$  處差異稍大。



圖 9 暫態 200 秒 XY 平面溫度場分佈圖

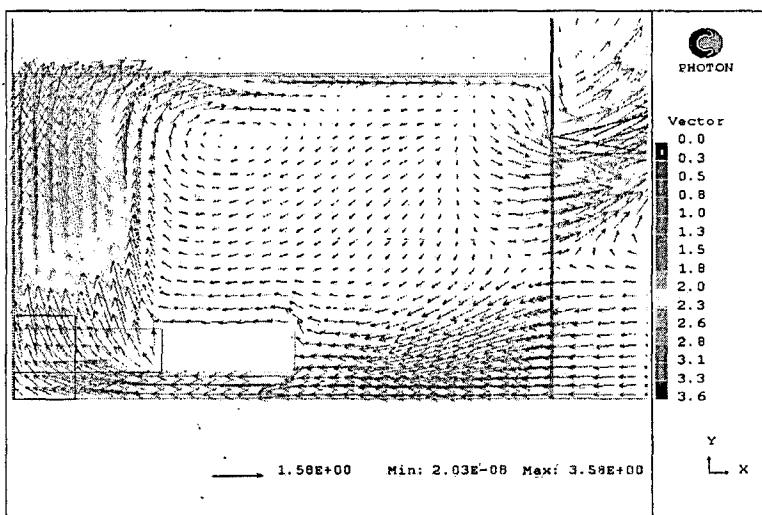


圖 10 暫態 200 秒 XY 平面速度場分佈圖

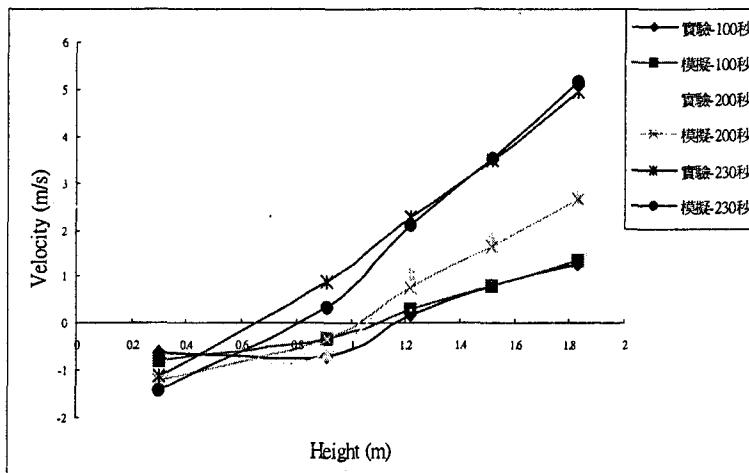


圖 11 實驗與模擬在門口之速度比較圖

本文採用  $D$ 、 $T_w$ 、 $T$  模擬數據，將場模式格點的數據轉成可用於閃燃理論計算之形式，由於閃燃理論是以區域模式的方式來計算，均取平均值，因此將場模式格點數據相加後除以加總之格點數，求出各參數之平均值來比較。利用  $T_w$ 、 $T$  計算出  $\beta$  值，再代入程式內做計算，在計算閃燃過程中， $D$  與  $\beta$  值隨著不同熱釋放率(以實驗值之熱釋放率來計算)而改變，當三者在某一時間下，只要符合閃燃臨界條件時，便可計算出閃燃發生的時間。由程式估算結果當熱釋放率為  $1871786.267\text{W}$  時， $D$  與  $\beta$  分別為 0.4186 和 0.506，其閃燃發生時間為 228.4 秒，與實驗值相差 4.6 秒。

CFAST 模擬與 Babrauskas、MQH ( $\Delta T = 575^\circ\text{C}$ 、 $h_k = 0.0279$ ) 閃燃發生的條件均為上層氣層溫度達  $600^\circ\text{C}$ ，而 Hägglund 和 Thomas 之閃燃估算法均計算發生閃燃所需最小熱釋放率，再與實驗熱釋放時段比較求得閃燃時間，各模式閃燃時間預測說明如表 4。

表 4 不同閃燃模式下閃燃時間預測說明表

閃燃模式	閃燃預測時間(s)
閃燃理論模式(配合場模式模擬數據)	228.4
CFAST	221.4
Babrauskas	221.6
Hägglund	223.3
MQH	222.2
Thomas	221.5



由表 4 可得知 CFAST 模擬與閃燃相關估算模式所預測之閃燃時間在 221.4~223.3 秒之間，與實驗閃燃時間最大相差 11.6 秒，已相當接近實驗值，而將閃燃理論配合數值模擬數據來估算閃燃時間時更加精準。

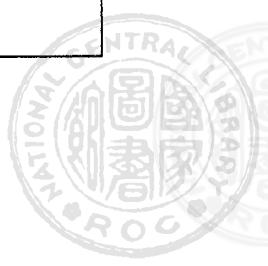
## 柒、結論

閃燃發生之前的時間通常為人員最大的可容許逃生時間，因此能精確的預測閃燃時間才能在火災未發生前做好防護措施，或者讓防護方法發揮最大的效用，因此閃燃時間的預測與控制在火災防護上具有多重意義。

本文利用場模式模擬軟體估計火場中上層空間溫度、牆壁溫度、熱不連續平面高度之分量隨時間變化的情形，將場模式模擬數據加入閃燃理論，以減少閃燃理論之假設項目，增加火災情境的真實性，使得閃燃時間預測最接近實際火場。其它四個閃燃估算式和區域模式模擬所得閃燃時間與實驗值均相當接近，因實驗之熱釋放率在 220~230 秒間熱釋放率迅速提升，顯示閃燃現象即將發生，從表 4 可看出閃燃時間預測均在此一時段內，各模式都仍有不錯的精確度。

## 符號說明

係數	說明	數值	係數	說明	數值
$m$	熱氣層內的總質量(kg)	12.96	$h_c$	熱牆表面之對流熱傳係數(W/m <sup>2</sup> K)	7
$c_p$	比熱容(在壓力為常數下)J/kg K or kJ/kg K	1003.2	$h_v$	開口之對流熱傳係數(W/m <sup>2</sup> K)	9
T	溫度(K)		$\alpha_g$	氣層輻射率	0.1
t	時間(s)		$A_L$	圍繞著下層區域之牆的表 面積(m <sup>2</sup> )	23.8144
$\dot{G}$ 、 $\dot{L}$	熱氣層之熱增、熱損率(J/s)		$T_f$	燃料基部的溫度(K)	296
$\chi$	燃燒過程的效率(到達熱煙 層之理論熱值分量)	0.8	$T_w$	上層牆之溫度(K)	
$\Delta h_c$	燃燒熱(J/kg)	1.8181E7	$\tau$	$\tau = t / t_*$ 無因次時間	
$\Delta h_{vap}$	固體燃料的蒸發熱(J/kg)	2.32E6	$\theta$	$\theta = T / T_0$ 無因次溫度	
$A_f$	熱分解的面積(火源的表面 積)(m <sup>2</sup> )	2.82	$t_*$	特徵時間(s)	



$q''$	從火源射入燃料之熱通量 (J/s m <sup>2</sup> )		$Q_0$	$Q_0 = \chi \Delta h_c q'' A_f / \Delta h_{vap}$ 熱 釋放率(J/s)	
$\alpha_u(T)$	熱氣層在溫度 T 時，輻射 回饋係數	0.4	$\theta_w$	牆之無因次溫度	
$\sigma$	Boltzman 常數(W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	5.66E-8	$\theta_f$	燃料之無因次溫度	
$T_0$	下層初始溫度(K)	296	$\beta$	牆之熱慣性	0.1
$c_d$	排放係數	1	A	開口面積(m <sup>2</sup> )	1.5428
$\rho_0$	下層初始密度/空間初始密 度(kg/m <sup>3</sup> )	1.16	h	開口高度(m)	2.03
$A_v$	開口面積(m <sup>2</sup> )	1.5428	$A_T$	有效熱傳之表面積(含開口) (m <sup>2</sup> )	47.6288
$g$	重力加速度(m/s <sup>2</sup> )	9.8	$T_*$	臨界溫度(K)	
$H'_v$	$H'_v = (1 - D)H_v$ 熱氣流出 開口的部份		$h_k$	$h_k = \sqrt{\frac{\rho c k}{f}}$ 至天花板/牆之 有效熱傳係數(kW/m <sup>2</sup> K)	0.0279
$A_u$	圍繞著煙層之牆的表面積 (含開口)(m <sup>2</sup> )	23.8144			

## 參考文獻

- [1] Graham, T. L., Makhviladze, G. M. and Roberts, J. P., "On the Theory of Flashover Development", Fire Safety Journal, Vol. 25, pp. 229-259, 1995.
- [2] Graham, T. L., Makhviladze, G. M. and Roberts, J. P., "The effects of the thermal inertia of the walls upon flashover development", Fire Safety Journal, Vol. 32, pp. 35-60, 1999.
- [3] Novozhilov, V., "Flashover control under fire suppression conditions", Fire Safety Journal, Vol. 36, pp. 641-660, 2001.
- [4] Jolly, S. and Saito, K., "Scale Modeling of Fires with Emphasis on Room Flashover Phenomenon", Fire Safety Journal, Vol. 18, pp. 139-182, 1992.
- [5] Holborn, P. G., Bishop, S. R., Drysdal, D. D. and Bread, A. N., "Experiment and Theoretical Model of Flashover", Fire Safety Journal, Vol. 21, pp. 257-266, 1993.
- [6] Richard D. Peacock, Paul A. Reneke, Richard W. Bukowski, Vytenis Babrauskas, "Defining flashover for fire hazard calculations", Fire Safety Journal, Vol. 32, pp. 331-345, 1999.



- [7] McCaffrey, B. J., Quintiere, J. G., and Harkleroad, M. F., "Estimating Room Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations", *Fire Technology*, Vol.17, No. 2, pp. 98-119, 1981.
- [8] Bishop, S. R., Holborn, P. G, Bread, A. N. and Drysdal, D. D., "Nonlinear Dynamics of Flashover in Compartment Fires", *Fire Safety Journal*, Vol. 21, pp. 11-45, 1993.
- [9] Chow, W. K., "New Inspection Criteria for Flashover in Compartmental Fires", *Fire Material*, Vol. 23, pp. 13-15, 1999.
- [10] Yuen, W. W., Chow, W. K., "The role of thermal radiation on the initiation of flashover in a compartment fire", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 4265-4276, 2004.
- [11] Babrauskas V., "Estimating room flashover potential. *Fire Technology*", Vol. 16, No. 2, pp. 94-103, 1980
- [12] Hägglund B., "Estimating flashover potential in residential rooms", (FOA Rapport C 20369-A3) Forsvarets Forkningsanstalt, Stockholm, 1980.
- [13] Thomas P. H., Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms, *Fire Material*, Vol. 5, pp. 103-111, 1981.
- [14] Charles V., "Effect of Wall and Room Surfaces on the Rates of Heat, Smoke, and Carbon Monoxide Production in A Park Lodging Bedroom Fire", NBSIR 85-2998, ed. B. T. Lee, National Bureau of Standards (now NIST) Center for Fire Research, pp. 1-50, 1985.

