

國立交通大學  
機械工程學系  
碩士論文



中華民國一〇三年六月

# 居室夾層簡易二層法之研究

學生：游惟翔

指導教授：陳俊勳

國立交通大學機械工程學系碩士班

## 摘要

本論文之研究動機係以發展一套適用於小居室(面積 $\leq 200m^2$  .高度 $\leq 8m$ )煙層高度計算之簡易二層法，因採用「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」進行居室避難安全性能驗證時，其煙層高度下降過快，不堪合理性，故擬針對小居室採用簡易二層驗證技術以取代技術手冊之驗證方式，本簡易二層法之模擬結果與日本 BRI2002 相近並加入自然排煙或機械排煙設備準確預估火場人員之避難安全性，本程式相關數值模型係依技術手冊規定，並與 FDS 及實驗互相比對確認本程式之可靠度。本論文亦在既有簡易二層法架構下，增列熱輻射模型將其改良使本程式更符實際狀況。令目前許多小居室空間有夾層之設計，本論文亦增列夾層於現有之簡易二層法中，使其功能亦可擴充至小居室有夾層下之煙沉降間之評估。

關鍵字：火災模擬軟體 FDS、簡易二層法、熱輻射、居室夾層

# The Study of Two-Layer Zone Model for Space with Mezzanine

Stuent : Wei-Shuang Yu

Advisor : Prof. Chiun-Hsun Chen

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

## ABSTRACT

The motivation to develop two-zone fire model is the smoke descending rate in small space (area  $\leq 200\text{m}^2$  and height  $\leq 8\text{m}$ ) with combustible is so quickly by the common-used method based on “The Building Fire Protection and Evacuation Safety Performance Verification Technique Manual” that is somewhat unrealistic. Therefore, a two-layer zone model similar to the one of BRI2002 is developed for the room equipped with the mechanical or natural de-smoke apparatus. Then, the model is verified by comparing with FDS and the one provided by the technical manual mentioned via numerical simulations. In addition, several experimental measurements are used to further confirm the accuracy of the developed two-zone model. These numerical and experimental comparisons indeed demonstrate the credibility and reliability of the model. Then, this study further includes the radiation model into such model to make it more completely. After that, a smoke movement model for space with mezzanine is enhanced into this two-zone model to meet the safety evaluation requirement for the more and more such building design cases.

**Key words:** FDS (Fire dynamic simulator), Two-layer zone model, Heat radiation, Space with mezzanine

# 目錄

<u>摘要</u> .....	I
<u>ABSTRACT</u> .....	II
<u>目錄</u> .....	III
<u>表目錄</u> .....	VI
<u>圖目錄</u> .....	VII
<u>單位符號對照表</u> .....	IX
<u>第一章 緒論</u> .....	1
<u>1.1 研究動機與目的</u> .....	1
<u>1.2 文獻回顧</u> .....	3
<u>1.3 研究內容</u> .....	8
<u>第二章 簡易二層法解說與推導</u> .....	10
<u>2.1 簡易二層法源由</u> .....	10
<u>2.2 火源設計</u> .....	11
<u>2.3 火災成長率 <math>\alpha_f, \alpha_m</math></u> .....	14
<u>2.3.1 堆積可燃物之火災成長率 <math>\alpha_f</math></u> .....	15
<u>2.3.2 內部裝修材料之火災成長率 <math>\alpha_m</math></u> .....	17
<u>2.4 煙生成率 <math>\dot{m}_s</math></u> .....	17
<u>2.5 居室有效排煙率計算</u> .....	19
<u>2.5.1 自然排煙計算</u> .....	19
<u>2.6 熱輻射</u> .....	20
<u>2.6.1 熱輻射之計算</u> .....	20
<u>2.6.2 形狀因子之計算</u> .....	22
<u>2.7 牆壁熱損失率計算</u> .....	23
<u>2.8 有效排煙熱損失計算</u> .....	24
<u>2.9 煙層溫度計算</u> .....	24
<u>2.10 煙層密度計算</u> .....	25

<u>2.11</u> 煙層厚度計算.....	25
<u>2.12</u> 煙層高度計算.....	26
<u>2.13</u> 簡易二層法解題程序.....	27
<u>2.14</u> C++撰寫.....	27
<u>第三章</u> 模擬軟體介紹.....	29
<u>3.1</u> 火災模擬軟體(FDS).....	29
<u>3.1.1</u> 流體力學之統御方程式.....	29
<u>3.1.2</u> 差分方程式.....	33
<u>3.1.3</u> 燃燒模式.....	36
<u>3.1.4</u> 热輻射之統御方程式.....	39
<u>3.1.5</u> 邊界條件.....	41
<u>3.2</u> 模型建立軟體 PyroSim .....	44
<u>第四章</u> 結果與討論.....	49
<u>4.1</u> 前言 .....	49
<u>4.2</u> 簡易二層法適用範圍及人員安全判斷標準 .....	49
<u>4.3</u> 本研究之簡易二層法版本歷程介紹.....	50
<u>4.4</u> 本研究與日本 BRI2002 驗證比對.....	55
<u>4.4.1</u> 相關文獻 .....	55
<u>4.4.2</u> 邊界條件設定 .....	56
<u>4.4.3</u> 模擬流程 .....	56
<u>4.4.4</u> 模擬結果 .....	56
<u>4.5</u> 各版本簡易二層法與 FDS 有無熱輻射模型之比較 .....	58
<u>4.5.1</u> 模擬結果 .....	58
<u>4.6</u> 本簡易二層法與 Chung 實驗、FDS 模擬之比較 .....	62
<u>4.6.1</u> 相關文獻 .....	62
<u>4.6.2</u> 邊界條件設定 .....	62
<u>4.6.3</u> 模擬流程 .....	62

<u>4.6.4</u> 模擬結果 .....	63
<u>4.7</u> 本簡易二層法與檢證法於 $100m^2$ 至 $300m^2$ 之比較 .....	67
<u>4.7.1</u> 邊界條件設定 .....	67
<u>4.7.2</u> 模擬結果 .....	67
<u>4.8</u> 夾層情境計算結果 .....	70
<u>4.8.1</u> 情境設定介紹 .....	70
<u>4.8.2</u> 邊界條件設定 .....	72
<u>4.8.3</u> 情境一模擬結果 .....	72
<u>4.8.4</u> 情境二模擬結果 .....	74
<u>4.8.5</u> 情境三模擬結果 .....	76
<u>4.8.5</u> 情境四煙層高度模擬結果與各情境之比較 .....	78
<u>4.9</u> 結論 .....	80
<u>第五章</u> 未來工作與建議 .....	81
<u>參考文獻</u> .....	82

## 表目錄

<u>表2.1</u> 火源成長模式係數 .....	13
<u>表2.2</u> 堆積可燃物每1平方公尺的發熱量 ( $q_I$ ) .....	15
<u>表2.3</u> 內部裝修材料火災成長率 $\alpha_m$ .....	17
<u>表2.4</u> 簡易二層方法之計算流程 .....	28
<u>表4.1</u> 人體承受危害程度指標值分析表(SFPE及紐西蘭設計) .....	49
<u>表4.2</u> 建議人員逃生安全環境要求.....	50
<u>表4.1</u> 本研究室各簡易二層法版本之功能.....	50
<u>表4.2</u> 第三版與第四版簡易二層法之比較 .....	54
<u>表4.3</u> 本程式與日本BRI2002之邊界條件設定 .....	56
<u>表4.4</u> 各簡易二層法版本比較之相關邊界條件設定.....	58
<u>表4.5</u> 本程式與FDS及Chung et al[17]實驗之邊界條件設定 .....	62
<u>表4.6</u> 本簡易二層法與檢證法相關邊界條界設定 .....	67
<u>表4.7</u> 夾層情境相關邊界條件設定 .....	72

# 圖目錄

圖1.1 我國防火避難安全驗證示意圖 .....	1
圖1.2 研究流程圖 .....	9
圖2.1 火災成長曲線圖 .....	13
圖2.2 T-Square火災成長曲線圖 .....	14
圖2.3 露台型煙柱流示意圖 .....	18
圖3.1 FDS分析執行計畫流程圖 .....	47
圖3.2 FDS 與Smokeview 之組織架構與工作流程圖 .....	48
圖4.1 Siegel and Howell選用之封閉模型示意圖 .....	54
圖4.2 本簡易二層法封閉模型示意圖 .....	54
圖4.3 本簡易二層法輻射封閉模型示意圖 .....	55
圖4.4 日本BRI2002與本程式煙層高度與時間關係圖 .....	57
圖4.5 各簡易二層法版本與FDS煙層溫度隨時間變化圖 .....	61
圖4.6 各簡易二層法版本、FDS與檢證法煙層高度隨時間變化圖 .....	61
圖4.7 Chung et al[17]實驗配置圖 .....	64
圖4.8 依據Chung et al[17]實驗之FDS模擬配置圖 .....	64
圖4.9 實驗熱釋放率時間之關係圖 .....	65
圖4.10 依據Chung et al[17]實驗之FDS熱釋放率與時間關係圖 .....	65
圖4.11 與實驗比對之煙層溫度與時間關係圖 .....	66
圖4.12 與實驗比對之煙層高度與時間關係圖 .....	66
圖4.13 樓地板面積100m <sup>2</sup> 煙層高度與時間關係圖 .....	69
圖4.14 樓地板面積200m <sup>2</sup> 煙層高度與時間關係圖 .....	69
圖4.15 樓地板面積300m <sup>2</sup> 煙層高度與時間關係圖 .....	69
圖4.16 夾層情境火源位置設計圖 .....	71

圖4.17 FDS夾層情境設置示意圖 .....	71
圖4.18 情境一煙層高度與時間關係圖.....	73
圖4.19 情境一煙層溫度與時間關係圖.....	73
圖4.20 情境二煙層高度與時間關係圖.....	75
圖4.21 情境二煙層溫度與時間關係圖.....	75
圖4.22 情境三煙層高度與時間關係圖.....	77
圖4.23 情境三煙層溫度與時間關係圖.....	77
圖4.24 各情境煙層高度與時間關係圖.....	79
圖5.1 居室內中性層與煙層示意圖.....	81



## 單位符號對照表

Q：火源的熱釋放率 (kW)

$\alpha$ ：火源的成長係數 (kW/s<sup>2</sup>)

t：開始燃燒後的時間 (sec)

$t_0$ ：有效的著火時間 (sec)，通常設定為 0

$t_g$ ：有效的燃燒後的時間 (sec)

A：居室樓地板面積(m<sup>2</sup>)

$A_c$ ：居室有效傳熱面積(m<sup>2</sup>)

$A_s$ ：自然排煙口之面積(m<sup>2</sup>)

$C_A$ ：自然排煙口煙層所籠罩之比例

$C_p$ ：空氣比熱，1.0(kJ kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)

c：牆壁牆壁之比熱 (kJ kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)

E：居室排煙率(m<sup>3</sup>/s)

e：單一排煙口的有效排煙率(m<sup>3</sup>/s)

H：居室天花板高度(m)

$h_k$ ：有效熱傳導率(kW/m<sup>2</sup>/K)

$h_s$ ：自然排煙口之淨高(m)

$k$ ：實驗係數(kg/s/kW<sup>1/3</sup>/m<sup>5/3</sup>)

$k_w$ ：周圍牆壁之熱傳導率 (kW/m/K)

$\dot{m}_e$ ：居室有效排煙率(kg/s)

$\dot{m}_s$ ：煙生成率(kg/s)

$\dot{Q}$ ：火源熱釋放率(kW)

$\dot{Q}_e$ ：有效排煙熱損失率(kW)

$\dot{Q}_w$ ：熱損失率(kW)

$q_l$ ：居室可燃物密度之發熱量(MJ/m<sup>2</sup>)

T：煙層溫度(K)

$T_0$  : 初期空氣溫度(K)  
 $t$  : 時間(sec)

$w$  : 單一排煙口的排煙率( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$W$  : 夾層邊緣寬度(m)

$Z$  : 煙層高度(m)

$Z_s$  : 煙層厚度(m)

$Z_{up}$  : 夾層至頂層煙層之高度(m)

$Z_{down}$  : 樓地板至夾層之高度(m)

$C_d$  : 流動係數

$T_a$  : 居室內溫度大小(K)

$T_g$  : 居室外溫度大小(K)

$A_0$  : 自然排煙口之面積( $\text{m}^2$ )

$C_p$  : 空氣之等壓比熱

$\bar{D}$  : 特徵長度(m)

希臘符號：

$\alpha$  : 火源成長係數( $\text{kW}/\text{s}^2$ )

$\alpha_f$  : 可燃物的火源成長係數( $\text{kW}/\text{s}^2$ )

$\alpha_m$  : 居室裝修材料的火源成長係數( $\text{kW}/\text{s}^2$ )

$\rho$  : 牆壁之密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_c$  : 牆壁之密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_s$  : 煙層密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\nu$  : 動力黏滯係數

$\bar{\rho}$  : 平均密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_g$  : 室外空氣密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_a$  : 室內空氣密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\delta$  : 煙層佔自然排煙口之有效高度(m)

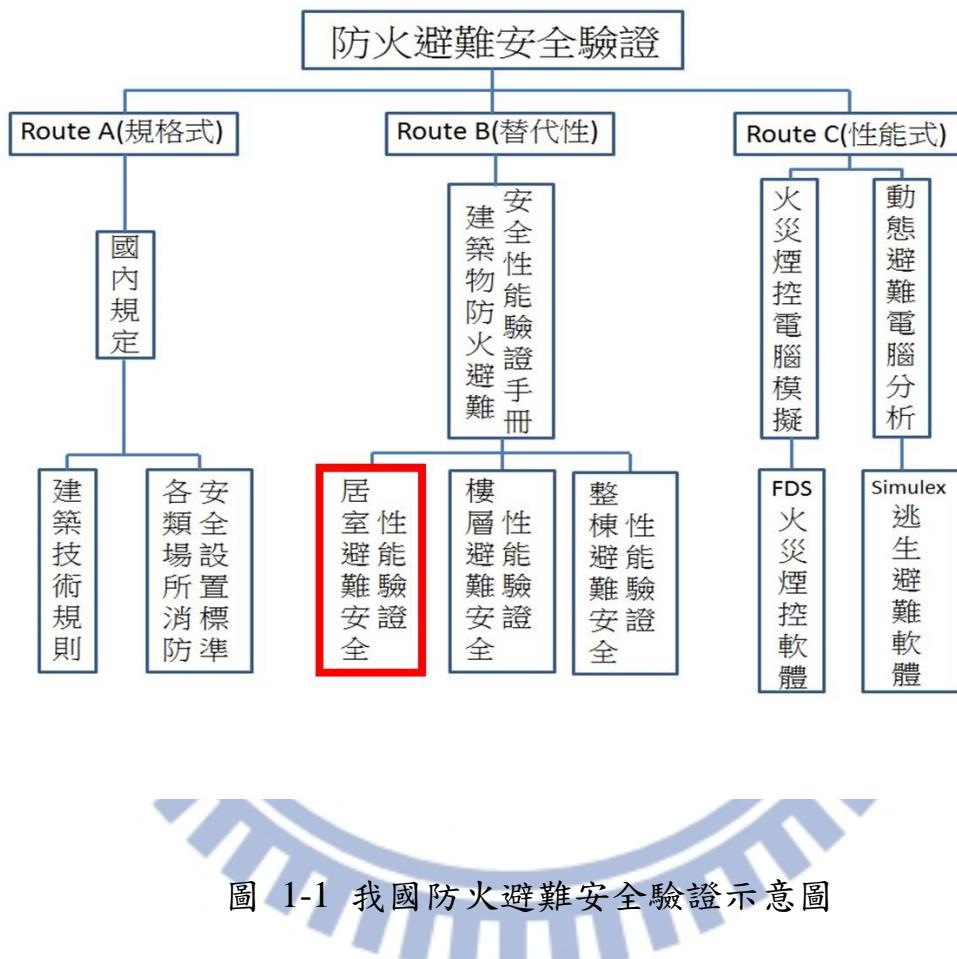
$\lambda$  : 牆壁之熱傳導係數 (kW/m/K)



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機與目的

隨著防火工程的發展，世界各先進國家依據科學為基礎進行避難安全工程之設計，為確保建築物內使用人員的安全不受煙火危害，我國目前採三種防火避難安全驗證，分別為法定規格式基準(Route A)、替代性



由於一般小居室(面積 $\leq 200m^2$ )天花板低(高度 $\leq 8m$ )，若堆積可燃物發煙量大，採用替代性方法(Route B)之「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」[1]進行居室避難安全性能驗證時，其驗證結果過於嚴苛，故本研究發展一套適用小居室火災發生時煙層下降預測之簡易二層驗證技術，並增列熱輻射模型於現有之簡易二層法來合理確認避難安全。其數學模式係將空間分為上下兩層，再以質量和能量守恆方

程式描述火場熱煙流動形式，透過輸入居室相關條件(如面積、高度、隔間牆材料和排煙手法)及火源大小，即可進行小居室煙流分析，再輔以避難分析來確認火場逃生之安全性。本程式發展完後，與火災模擬軟體 FDS 和「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」[1]模擬結果以及相關實驗數據進行互相比較，其結果來驗證本程式之可靠度和確認避難安全。

另目前許多小居室空間有夾層設計，若該空間為一獨立防火區劃，則在煙層下降時間上的評估較為單純，但大部分案例是上下層均與大氣相通，導致在煙流評估下會有很大的爭議，尤其是目前的簡易二層法(含 BRI2002)及建築物防火避難安全性能驗證技術手冊的計算方式，因均採二層法，無法確認火源位置。尤其當夾層出現時，火源位置的擺放會直接影響煙流動及其沉積下降時間，因此本論文亦擬在既有簡易二層法的架構下，再將其改良，使其功能亦可擴充至小居室有夾層下之煙沉降時間的評估。

## 1.2 文獻回顧

Meng and Chow[2]建立一個趨近於 FIRM 的數學模型。其模型適用於有開口之室內空間，由煙層下降於不同高度時，冷、熱空氣層壓力變化造成空氣吸入及排出分析。由火場相關理論指出，在空間內火源燃燒時，根據流體力學推導，室內存在一中性線，當冷熱空氣層高於中性線時，火場壓力將大於室外壓力而造成空氣排出之現象。當冷熱空氣交界線位於中性線時，冷空氣壓力與外界相同，所以不會排出。而當交界線低於中性線時，外壓力大於空氣壓力，冷空氣層將吸入外界空氣。此研究利用各種物理現象描繪火源，藉此趨近煙層真實情況。並透過實驗數據加強模擬之可信度。

Zhu et al.[3]針對潛藏有高發熱量貨輪之貨艙進行簡易二層法之研究，兩貨艙分別為  $6m \times 5m \times 3m$  和  $8m \times 6m \times 3m$ ，兩貨艙間之互通面積為  $1.5m \times 0.9m$ ，利用發煙量之經驗公式、能量方程式與質量守恆方程式計算出兩貨艙個別的溫度及煙層高度。最後其結果與 CFAST 火災模擬軟體操作之結果相當接近。

Keichi et al.[4]有別於之前二層的方法，首先提出多層區域模擬。並建立統馭方程式，以及模型架構。Chen et al. [5]繼續將 Keichi 的模型發展，並假設熱輻射的影響為 30%，且不忽略熱輻射下去推導出完整的數學模式，並與實驗相互比較，結果顯示，忽略熱輻射會造成較大的誤差，其中，以 Chen 的假設之熱輻射會更符合實驗之趨勢。並且使用此方法比一般 CFD 更節省電腦時間，與計算量，更有效率的求得所需之數據。

Harada[6]將 BRI2002 與實驗以及多層區域模擬作一個完整的計算模型報告，他提出在某些情境下，二層法的近似是不夠精確的，但是多層法可以解決這個問題，並且在多層下，可以完整的模擬火場發生歷史，讓使用者能更便捷的設計防火上的需求。

L. Yi et al.[7]使用簡易二層法預測天井前廳之燃燒情境。情境一  
共分為三種：煙層高度高於補氣口、煙層高度低於補氣口、煙層高度  
位於補氣口，並以相同尺寸之燃燒模型實驗驗證其預測之真實性。此  
外，並使用 FDS、CFD、CFAST 知名軟體做火場分析對比，其結果  
以 CFD 與簡易二層法和實驗最為接近。本篇論文指出，當煙層之高  
於樓層之安全高度時，低於煙層高度之補氣孔提供之空氣與作用之抽  
風口可讓火場不致快速惡化，可讓人安全逃生。當補氣口高度高於煙  
層高度時，送風口之空氣會直接進入煙層，諸如此類的情況應該被避  
免，因為混入的空氣會加速下沉之煙層，而在此情況下，煙層溫度會  
逐漸下降。

Chow et al.[8]等人藉由實驗及數學模擬，點出了早期對簡易二  
層法上下煙層不會混和的盲點。在一個有機械排煙裝置之挑高中庭的  
情況下，增加機械排煙之排煙率並不一定能使煙層高度停留得越高，  
而是取決於煙層是否會形成一個穩定且乾淨的狀態。因此，當混和的  
流動穿越煙層時勢必會成為問題所在，因為通常簡易二層法中不會假  
設有任何質量流率穿越煙層。然而，從本研究之實驗指出，在有機械  
排煙狀態下之煙層質量將不守恒。從本篇中初步的實驗指出，穿越煙  
層高度之質量流率將是機械排煙機排煙質量的百分之三十，而這項數  
據對將來預測在挑高中庭且具備機械排煙情境下的簡易二層法來說  
會是一個修正。

Huo et al.[9]由實驗之方法探討煙層是如何在挑高建築物中擴散  
開來。在方程式中探討到煙層之所以在挑高區擴散開原因是鄰近區塊  
的煙已經完全發展波及到陽台之原故。本篇研究啟用兩種不同的發煙  
量產生公式，分別為 Zukoski [10]和 NFPA-92B[11]，其結果與實驗相  
互對照。文中亦提到，通風口之因素在描述火源是否形成閃燃現象佔  
了很重要的角色。在通風口因素低且熱釋放率低的情況下，閃燃很容  
易就發生。然而，本篇論文點出，在通風口因素較高之情境下，挑高

空間產生的發煙量會更多，煙層下降速度會越快。

Hu et al.[12]透過同比例地下道之燃燒實驗探討補氣口設置位置及排風煙機在不同操作時間對煙層排出過程之影響。結果顯示，當補氣口位置與排風煙機鄰近時，即使排風煙機排風率在高，對煙層控制之影響仍越差。在地下道中，一個好的排煙系統應該具有能在起火點附近把煙排出且把空氣送的深遠之功能。監控系統是必須具備的，對於火災時那些遠離火點之排風煙機及離起火點太近之補氣口可有效關閉外；亦可對火災時那些遠離火點之補氣口及離起火點太近之排風煙機可有效開啟。一般認定當火災發生時，防火設備啟動越早越好。但本實驗以針對啟用時間之兩組實驗對照比較，結果顯示，排風煙機啟動越早對煙層控制就越差。比較好的啟用時間，應該是當煙層累積一定高度時啟用，效果最佳，特別是本次實驗的又低又長之地下道。當補氣口離排煙風機太近時，會發生類似“短路”之現象；而補氣口離火源太遠時，風壓下降太快以至於無法傳達至火源點。文中所示，排風煙機啟動太早導致煙層不穩定，當煙層太稀薄或未觸及排風煙口時，排風煙機只會把新鮮空氣排出；但也不可啟動過晚導致人員逃生困難。

1896

Li et al.[13]由實驗和數值模擬探討火場時撒水器對煙層高度之影響，將撒水器水滴之拉力(drag force)與空氣之浮力(buoyancy force)數值化做運算並與實驗結果相互對比。所有撒水頭之火災現場，煙層會因為水滴之拉力造成煙層有一小段之墜落。由實驗結果顯示，當浮力大於拉力時，煙層會呈現穩定之狀態；而當浮力小於拉力時煙層會呈現不穩定之狀態，且當撒水頭水壓越增加時，煙層下降高度會越高並呈線性成長。

Frederick et al[14]針對挑高中庭等建築物之火災情境電腦數值分析方法逐漸被探討，然而針對許多物理現象之演算方法也是相當重要的評估工具，此篇研究針對許多物理演算法之演化有相當多的琢磨。

最後經由實驗數據之比較發現，這些代數公式的應用可以相當的廣泛，此種方法在改變火焰的性質及煙層的描述上之探討相當的方便；然而，此方法在火場裡啟動風機的 600 秒後無法給予準確的預測，在此情況下代數方程式只能針對啟動風機前之火災行為進行評估。

Zhuman and George [15] 該研究分別探討所有與火災有關之物理現象、數值方法及相關驗證等，並針對單間及多隔間居室推導相關簡易二層法之一階微分方程式並考量相關變數如：壓力、焓值變化、及上下空氣層之質量變化。對於其他物理現象也有相當多的介紹及探討，其中包括：燃燒模型、自然對流、熱傳遞模式等...。此篇結論點出，在處理火災存在之居室時僅需考慮一階微分方程式即可，而隔間之探討須以非線性之代數方程式解決。而存在於煙層之焓值變化考量對該程式評估有很大的幫助。

Jones and Forney[16]針對知名模擬軟體 CFAST 改善，其中特別針對有毒氣體於多隔間之傳遞以及導入更新的物理現象探討垂直式自然排煙及機械風機排煙，最後針對熱輻射之傳遞進行改善及探討。

Chung et al[17] 根據火災重大傷亡資料顯示，比起火焰絕大多數的傷亡與煙層高度較有關係。此篇研究主要在於探討防煙捲簾(smoke curtain)在多重隔間(multi- compartment)發生火災時之功效外，防煙區劃對避難逃生行為之探討。除此之外，該篇研究亦針對多重隔間不同情境下之熱釋放率、煙層下降程度進行探討。雖然該研究並非直接針對單一居室進行對外排煙口之實驗研究，但該研究皆由單一火載居室排煙至各隔間，且實驗樣本多，故可用於本研究之比較。

Shi [18]為本研究室學長，針對目前簡易二層法進行程式撰寫與模擬比較並探討無排煙情境下相同居室體積但不同面積之樓高比與自然排煙情境下相同排煙口面積但不同面之寬高比對火煙之影響，其研究結果顯示，在居室體積相同的情境下，樓高越高煙層下降的速度越

快；在排煙口面積同的情境下，開口遮蔽率及開口下緣對排煙效果的好壞有絕對的影響。

Petterson[19]利用 McLeans Island 的小型房間火災實驗(55KW、110KW) 與 Navy Hanger 的大型火災實驗(5580KW、6670KW)，與 FDS 所建立的模型進行比較，且用 CFAST 建立 McLeans Island 的房間模型，比較 CFAST 模擬之區域模式與 FDS 的場模式，他表示在小型房間火災即紊流強度較弱時，且用三種格點加密(100mm、150mm、300mm) 的比較結果下，FDS 在 100mm、150mm 的預測比較準確。

Roger[20]以 1/10 物理尺寸建造居室夾層火場模型，模擬露臺型煙柱流(Balcony Spill Plumes)、附著型煙柱流(Adhered Spill Plumes)等各種室內夾層之煙層流動情形，提供相關實驗數據及探討室內居室煙層流動至中庭挑高空間之物理特性，並參考 SHEVS(Smoke and Heat Exhaust Ventilation System) 作經驗公式的簡化及推導。

Kumar [21]利用理論數值計算方法探討邊緣效應之二維及三維露臺型煙柱流之現象，並與相關 CFD 模擬軟體與 Roger 所進行實驗進行比較，其結果發現當天花板高度等於三倍夾層高度時，其煙生成率計算結果與實驗數據最為接近。

L. Yi [22]利用實驗探討居室外部風場對於簡易二層法自然排煙情境之影響，引入相關排煙口壓力計算方法於簡易二層法中，並設計不同排煙口及補氣口位置(迎風面、背風面、測風面)進行比較，探討風速、風壓、熱損失、煙層高度及煙層溫度度對於排煙效率之影響，其結果發現設置排煙口於非迎風面及補氣口於迎風面，將使排煙口附近之壓力差達到最大，並可擁有較佳的排煙效率。

### 1.3 研究內容

本研究的主要目的為增列熱輻射於現行使用之簡易二層計算法。論文首先推導於火場適用之統御方程式，方程式包含質量守恆方程式、能量守恆方程式及熱輻射公式等，並利用數值模擬方法將上述方程式編寫程式，進行數值分析模擬。本程式中使用之相關經驗公式部分參考內政部建築研究所出版之「建築物防火避難驗證技術手冊」及國外 Fire Safety Journal 上刊登與簡易二層法相關之研究。其中半經驗公式包含煙生成半經驗公式、自然排煙公式等。程式完成後即開始進行相關驗證，首先和相關文獻實驗之相互比較，再與美國 NIST (National Institute of Standards and Technology) 發展之火災分析模擬軟體 FDS (Fire Dynamics Simulator)、日本 BRI2002 模式及建築物防火避難驗證技術手冊之計算公式作比較，以驗證本程式在實行上之可靠性。

本論文研究重點如下：

1. 分析簡易二層法之數學模式，將空間分為上下兩層，在以質量和能量守恆方程式描述火場熱煙流動形式，透過輸入居室相關條件(如面積、高度、隔間牆材料和排煙手法)及火源大小，進行小居室煙流分析。
2. 利用相關實驗文獻中小居室於火場之各項表現，於 FDS 中建立模型，並探討自身撰寫之程式數值分析結果與 FDS 模擬結果、相關實驗及日本 BRI2002 之差異性並進行驗證，以達到自身程式之正確結果及可靠度。
3. 規劃相關火源情境於居室夾層中，並進行情境模擬分析，

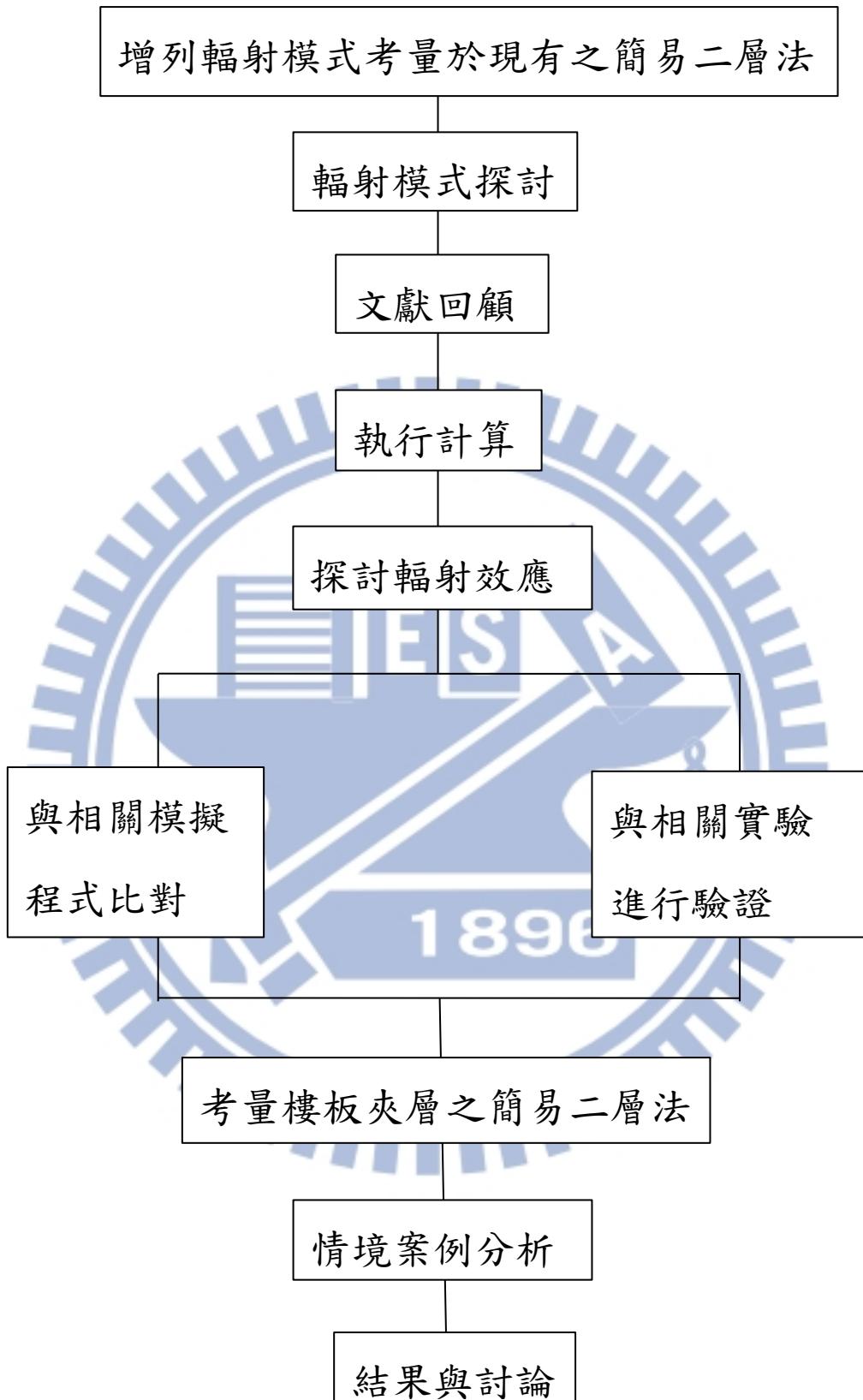


圖 1-2 研究流程圖

## 第二章 簡易二層法解說與推導

### 2.1 簡易二層法源由

針對每個可能起火的小居室，在假設火災發生之情況下確認居室人員是否可以安全的避難至小居室外部。

居室避難性能驗證具體而言之，排除明確較不可能發生火災場所外；如廁所、浴室、冷藏室、不可燃物質之儲存室等，全部居室均需以避難性能驗證法驗證其避難安全。故要先計算居室人員避難至居室外部所需之時間，次之計算居室煙層下降至造成避難障礙高度形成避難危險之時間，最後再確認完成居室避難所需之時間是否超過煙層下降時間。

另一方面，zone model無論是在計算上、或是火災行為與性質狀態上之探討都較field model要來的簡便，故也更適合現實上的建築設計使用，若內部空間發生火災時，初期之火災行為與性狀分析，則將內部空間劃分為兩大層狀區域，分別為上方高溫層（煙層）及下方空氣層，而成熟期之內部空間火災也可以利用區域的觀念來探討。同時，建築物內部空間的煙流動與控制，也可以藉由找到合適之層狀區域類型來進行解析。

## 2.2 火源設計

建築物發生火災出現可能之危險情境依火災位置、規模、防災設備性能、人員應變及管理能力而有所不同，任一種變數都足以影響火災的成長及其可能導致之危險性。

火源的設計對煙控系統有決定性的影響，並且於設計時，需考慮隨時間變化的熱輸出值。在火災的初期階段，熱釋放率由燃燒體之性質、數量及大小來決定。如果火源持續擴大，導致閃燃的發生時，此刻的煙控系統就會失效。但是如果火源發生的區域在與大空間連接的小區域內，經由門或窗進入大空間的煙流仍可利用煙控系統加以控制，以避免煙流的擴大。因此，火源的成長期為人員逃生避難的最佳時期，同時也是消防煙控設計的關鍵時期。

本研究火源大小採 NFPA92B[11] 設計，如下所式：

$$Q = \alpha(t - t_0)^n \quad (2.1)$$

其中  $Q$  為火源的熱釋放率( $\text{kW}$ )、 $\alpha$  為火源的成長係數( $\text{kW/s}^2$ )、 $t$  為開始燃燒後的時間 ( $\text{sec}$ )、 $t_0$  為有效的著火時間 ( $\text{sec}$ )，通常設定為 0。而本模擬設定居室一開始即為點燃之狀態，故上是可簡化為以下型式：

$$Q = \alpha t_g^2 \quad (2.2)$$

其中  $t_g$  為有效的燃燒後的時間 ( $\text{sec}$ )

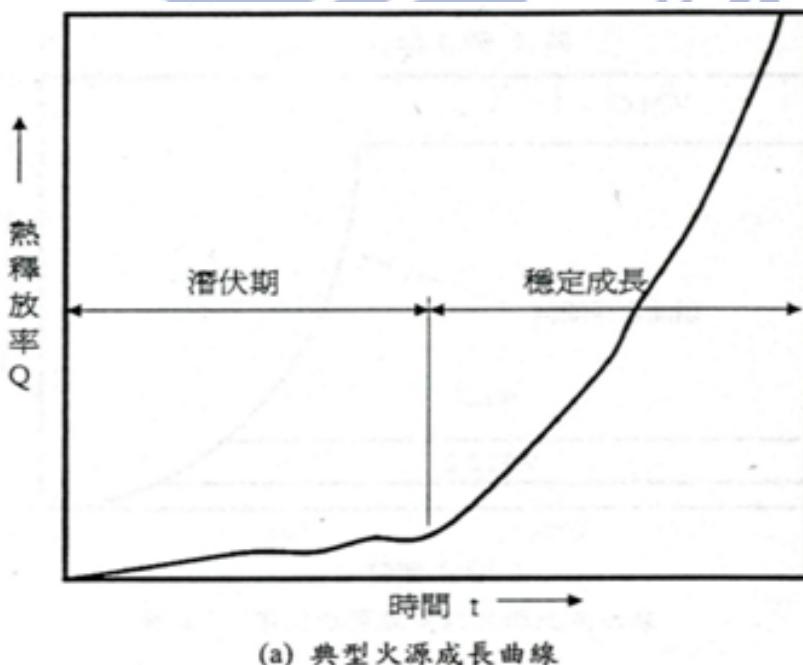
設定火源大小是火災危險評估 (fire hazard assessment) 中最重要的部分，因為火災產生之濃煙的沈降與煙控系統 (smoke management system) 之設計均受設定的火源大小影響。一般火災強度的設定分為穩態火源 (Steady fire)、非穩態火源 (Unsteady fire) 以及實驗量測火災成長曲線三種方法。

## 穩態火源 (Steady fire)

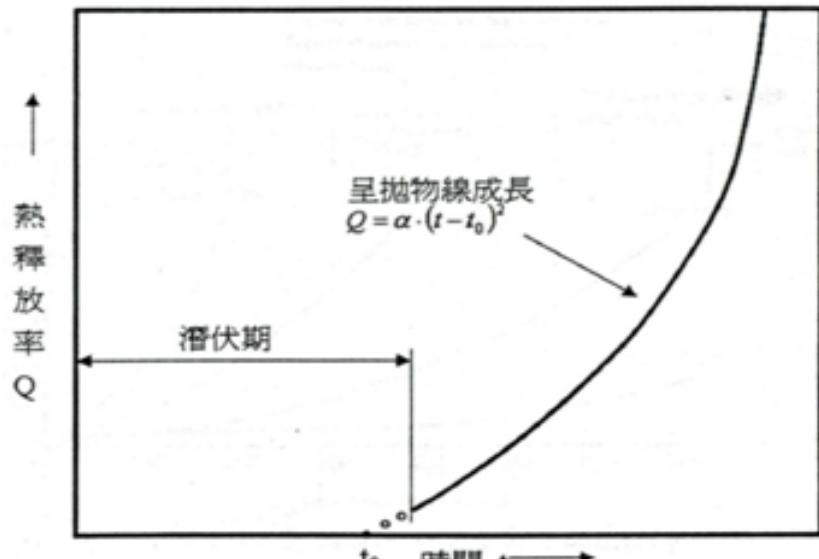
一般在自然狀態下火源是不穩定的，但為使火源較容易描述以及研究上的需要，因此將火源假設為穩態火源。穩態火源與非穩態火源的最大差異處為穩態火源之熱釋放率為定值，非穩態火源之熱釋放率則會隨時間以及可燃物的性質改變。

## 非穩態火源 (Unsteady fire)

在本研究中，則是認為大多數的燃燒火源在發展期間的熱釋放率非常低，且其熱釋放率會隨時間變化，因此將火災成長狀況理想化，以拋物線方程式表示 (Heskestad, 1984[23])，也就是將式 (2.1) 中的  $n$  取 2 並且加入不同火源成長時間的觀念成為如式 (2.2) 所示，意即當火源成長至一臨界點後，其熱釋放率會與時間的平方成正比，如圖 2.1(a)、2.1(b) 所示。



(a) 典型火源成長曲線



(b) 理想二次火源成長曲線

圖 2.1 火災成長曲線圖

此式稱為 "T-Squared Fires"，本研究使用成長時間的觀念，成長時間  $t_g$  定義為有效燃燒之成長至 1,055kW 以後之時間，而 T-Squared Fires 依火源成長速率又可區分成 Ultra-fast、Fast、Medium 及 Slow 四種成長曲線，各種型式的火源成長係數與成長時間如表 2-1 所示。各種火源成長型式及其各類替代物質如圖 2.2 所示。

表 2-1 火源成長模式係數

項目	成長係數	成長時間
T-Squared Fires	$A (\text{kW/s}^2)$	$t_g (\text{s})$
緩慢 (Slow)	0.002931	600
普通 (Medium)	0.01127	300
快速 (Fast)	0.04689	150
極快速 (Ultra Fast)	0.1878	75

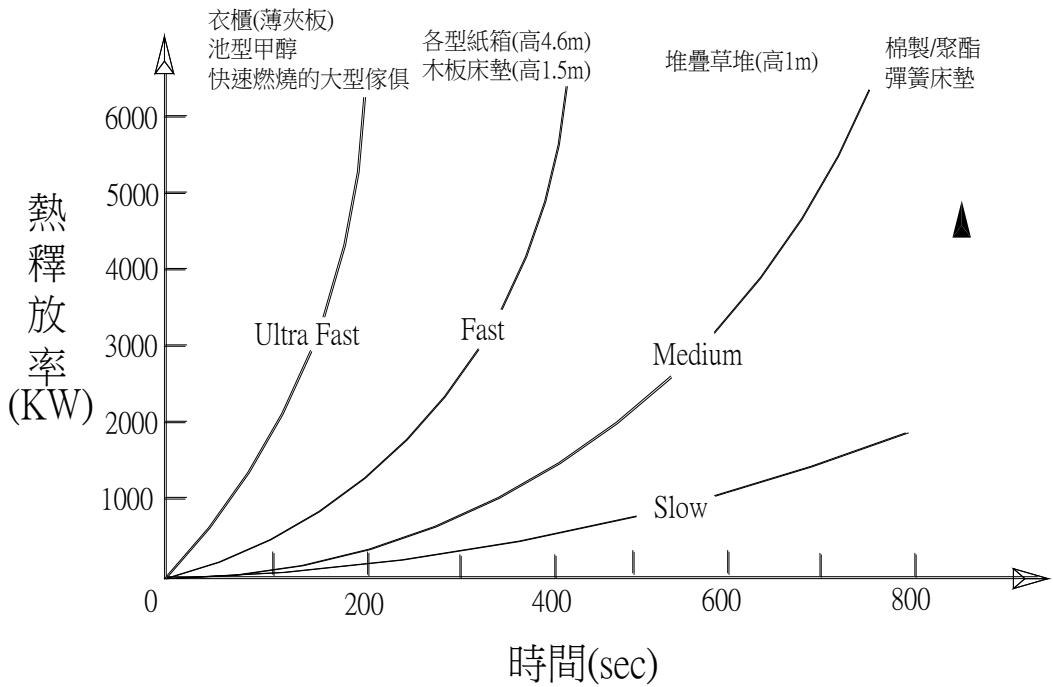


圖 2.2 T-Square 火災成長曲線圖

定義火源熱釋放率的方式為火災發生時啟動撤水系統裝置，並將火源熱釋放率控制使達到穩定狀態，抑制閃燃現象發生的狀況。

### 2.3 火源成長率 $\alpha_f, \alpha_m$

$\alpha_f, \alpha_m$  皆為可燃物火災延燒之火災成長率， $\alpha_f$  為堆積可燃物之火災成長率， $\alpha_m$  為內部裝修材料之火災成長率。其中，總火災成長率  $\alpha = \alpha_f + \alpha_m$ 。

$\alpha_f, \alpha_m$  表示所有可燃物開始燃燒擴大狀況，一般稱為火災成長率。 $\alpha_f$  依堆積可燃物的發熱量，應用公式 (2.3a)、(2.3b) 計算其值， $\alpha_m$  則依據牆壁及天花板材料設置的種類，查表 2-2 得其值。假設該居室內有許多用途，則每  $1m^2$  的堆積可燃物發熱量會隨著用途的不同而有所差異，因此可依各用途面積比率，計算其平均發熱量後，再用平均發熱量計算火災成長率  $\alpha_f$ 。

### 2.3.1 堆積可燃物之火災成長率 $\alpha_f$

根據堆積可燃物之火災成長率  $\alpha_f$  值，吾人參閱建築物防火避難安全性能驗證技術手冊[1]第二章第 19 節計算方式。相關計算如下所示：

$$\text{i. } \alpha_f = 0.0125 \quad (q_l \leq 170) \quad (2.3a)$$

$$\text{ii. } \alpha_f = 2.6 \times 10^{-6} \times q_l^{5/3} \quad (q_l > 170) \quad (2.3b)$$

其中  $q_l$  為居室可燃物每單位面積之總發熱量( $\text{MJ/m}^2$ )。依照表 2-2 用途設定其值。

表 2-2 堆積可燃物每 1 平方公尺的發熱量 ( $q_l$ )

編號	居室的種類	發熱量 (單位 $\text{MJ/m}^2$ )	
(一)	住宅的居室	720	
	住宅以外建築物內的臥室	240	
(二)	辦公室及其他類似場所	560	
	會議室及其他類似場所	160	
(三)	教室	400	
	體育設施的運動場及其他類似場所	80	
	博物館或美術館的展示場及其他類似場所	240	
(四)	百貨商場或其他販賣 物品的店鋪	家具或書籍等賣場及其 他類似場所	960
		其他	480
	餐飲店或其他餐廳	簡易餐廳	240
		其他餐廳	480

(五)	劇場、電影院、演藝場、觀覽場、集會廳、集會場及其他類似場所	觀眾席部份	固定座位	400	
			其他	480	
		舞台部份	240		
(六)	室內停車場或汽車修理場	室內停車場或其他類似場所		240	
		車道及其他類似場所		32	
(七)	走廊、樓梯、及其他通道			32	
	玄關、大廳及其他類似場所	劇場、電影院、演藝場、觀覽場、集會廳、集會場及其他類似場所或百貨商場或其他販賣物品的店鋪，以及其他作為類似該用途之場所		160	
		其他		80	
(八)	升降機及其他建築設備的機械室				160
(九)	頂樓廣場或陽台				80
(十)	倉庫及其他儲放物品的房間				2,000

單位樓地板面積堆積可燃物發熱量  $q_1$  小於 170 (MJ) 時，其堆積可燃物之火災成長率全部設定為 0.0125；但若堆積可燃物之發熱量  $q_1$  大於 170 (MJ) 時，其火災成長率隨著每  $1m^2$  的堆積可燃物之發熱量而變更。

每  $m^2$  堆積可燃物發熱量  $q_1$  依上表用途設定其值，對於同一居室內有不同的用途，則依面積比率計算其平均值。

### 2.3.2 內部裝修材料之火災成長率 $\alpha_m$

內部裝修材料之火災成長率依  $\alpha_m$  表 2-3 所示規定數值。

內部裝修材料之火災成長率  $\alpha_m$  是依照面對該居室牆壁（離地板高度 1.2 公尺以下者除外）、天花板（無天花板時以屋頂代替）及室內部份（迴廊、窗台及其他類似部分除外）裝修材料耐燃等級的不同，請參照表 2-3 所示規定數值。

表 2-3 內部裝修材料火災成長率  $\alpha_m$

裝修材料耐燃等級	成長係數(kW/s <sup>2</sup> )
耐燃一級	0.0035
耐燃二級	0.014
耐燃三級	0.056
其他	0.35

### 2.4 煙生成率 $\dot{m}_s$

1982 年由 Zukoski E.E[10]. 所推導出，在密閉居室無夾層空間之煙生成率如下列計算式所示：

$$\dot{m}_s = k \dot{Q}^{1/3} Z^{3/5} \quad (2.4)$$

其中  $\dot{Q}$  為火源熱釋放率 (kW)、 $Z$  為煙層高度 (m)、 $k$  為實驗係數，一般情況下  $k$  值通常為  $0.076(\text{kg/s}/\text{kW}^{1/3}/\text{m}^{5/3})$ ，該實驗由 Heskestad 於 1986 所做之相關實驗得到。

2008 年 Roger H.[20].對煙柱流進行研究及推導，其表示火災發生之位置為中庭且四方空氣補足狀態下，居室夾層之煙柱流，即露台型煙柱流(Balcony spill plume)煙生成率如下列計算式所示：

$$\dot{m}_{up} = 0.16(\dot{Q}W^2)^{1/3}Z_{up} + 1.34\dot{m}_s \quad (2.5)$$

其中  $\dot{Q}$  為火源熱釋放率 (kW)、 $W$  為夾層邊緣寬度 (m)、 $Z_{up}$  為夾層至頂層煙層之高度、 $Z_{down}$  為樓地板至夾層之高度。

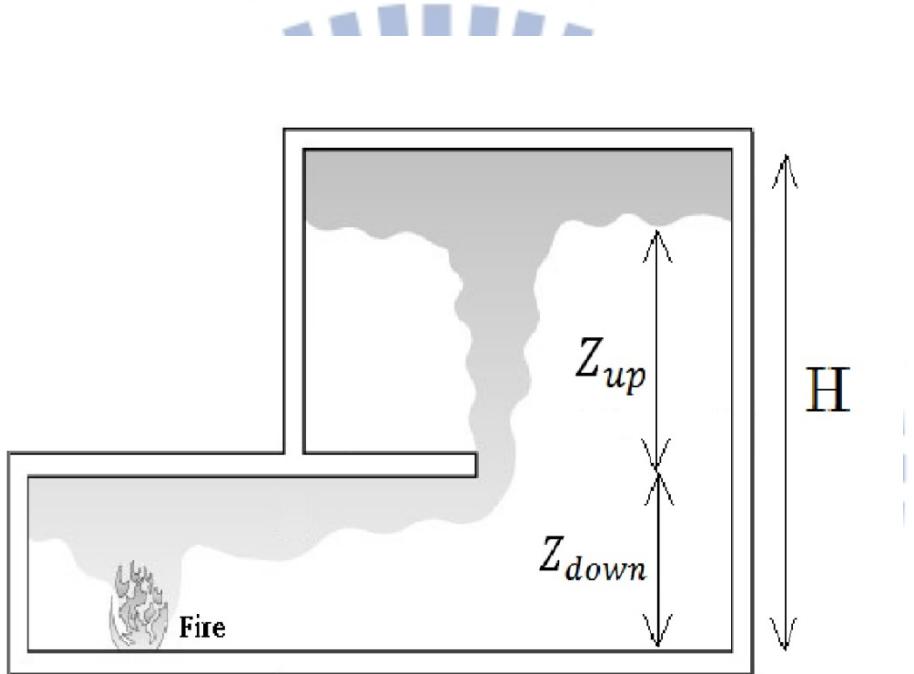


圖 2.3 露台型煙柱流示意圖

根據過去的研究成果得知，一般煙霧產生量與火源發熱速度的  $1/3$  次方及煙層下端高度的  $5/3$  次方成比例關係。而詳細的計算則應以微分方程式求解，這裡提出的是以簡易方法來計算從起火開始到降至避難障礙高度期間之平均煙生成率。

其中，煙生成率  $\dot{m}_s$  及  $\dot{m}_{up}$  公式之  $\dot{Q}^{1/3}$  係指火災表面最大燃燒速度，受此項的影響，熱釋放率越大，則其煙霧的生成率就越大； $Z^{5/3}$  及  $W^{2/3}Z_{up}$  表示火災熱氣流週遭空氣的捲入，使濃煙量增大的程度。

## 2.5 居室有效排煙率計算

小居室在排煙表現上主要分為兩種：機械排煙、自然排煙。機械排煙為排煙口設有排煙風管及排煙機，強制將煙排出屋外的方法，排煙效率佳，且可以於任何火場情境中提供穩定的排煙量。而自然排煙為高於居室 1.8 公尺以上的通風口及窗戶等之有效排煙面積，藉由自然對流方式將煙排出屋外的方法，該排煙方法會因不同排煙口之高度及排煙口大小影響其排煙效果。

機械排煙雖然在排煙表象上較為出色，但普遍一般居室中是不會搭載機械排煙風機的。本研究著重於一般居室火場之研究，故不針對存在機械風機之居室進行探討。

### 2.5.1 自然排煙計算

計算居室有效排煙速率時需考量到煙層密度與排煙效率，其計算式如下所示：

$$\dot{m}_e = \frac{\rho_s E}{60} \quad (2.6)$$

居室排煙率  $E$  則可由下列計算式求得：

$$E = \sum e \quad (2.7)$$

i.  $e = 3.9Z_s w^{2/3}$  ( $w > 60Z_s^3$ )

ii.  $e = w$  ( $w \leq 60Z_s^3$ )

其中

$\rho_s$  : 煙層密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$E$  : 居室排煙率 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

e : 單一排煙口的有效排煙率( $\text{m}^3/\text{s}$ )

w : 單一排煙口的排煙率( $\text{m}^3/\text{s}$ )

居室自然排煙率 E 則可由下列計算式求得：

$$E = 19A_s \sqrt{h_s} C_A^{3/2} \quad (2.8)$$

$$C_A = \delta / h_s \quad (2.9)$$

其中

$A_s$  : 自然排煙口之面積( $\text{m}^2$ )

$h_s$  : 自然排煙口之淨高(m)

$C_A$  : 自然排煙口煙層所籠罩之比例

$\delta$  : 煙層佔自然排煙口之有效高度(m)

## 2.6 热輻射

### 2.6.1 热輻射之計算

當居室內存在一火源時，熱輻射將是一個相當重要的物理特性。

當火源開始燃燒時，由火源釋放的熱空氣經由浮力及混入的空氣上升至熱空氣層的同時，熱輻射亦會提供相當可觀的能量給熱空氣層及其他部分區域。於火場發生的居室內吾人取上部天花板為一上平面，地板為一下平面。除此之外，並假設位於地板處之火源點為一黑體輻射且為一球狀散射，球狀的輻射在任何方向及角度都是均勻的。該熱輻射能量交換機制牽涉上下平面及熱空氣層。

在此假設下，存在煙層之熱空氣層為一吸收媒介，而下空氣層則視為可穿透層，吸收率忽略不計。而這種熱輻射之傳遞模式可以下列數學模式觀察其變化，相關數學模型已於 1992 年 Siegel R 及 Howell J[25]推導出：

$$\sum_{j=1}^N \left( \frac{\delta_{kj}}{\varepsilon_j} - F_{kj} \frac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j} \bar{\tau}_{kj} \right) q_j = \sum_{j=1}^N [(\delta_{kj} - F_{kj} \bar{\tau}_{kj}) \sigma T_j^4 - F_{kj} \bar{\alpha}_{kj} \sigma T_g^4] \quad (2.10)$$

其中  $q_j$  是傳遞至  $j$  表面之總熱輻射， $\delta_{kj}$  為 Kronecker 函數， $\varepsilon_j$  是  $j$  表面之釋放率， $F_{kj}$  為從  $k$  至  $j$  之形狀因子(view factor)， $\bar{\alpha}_{kj}$  及  $\bar{\tau}_{kj}$  為從  $k$  至  $j$  之幾何平均吸收率及幾何平均穿透率， $T_j$  及  $T_g$  分別為表面  $j$  及氣體的溫度。

對各個表面而言，下列關係可得如下：

當  $k=u$ ：

$$\left( \frac{1}{\varepsilon_u} - F_{uu} \frac{1-\varepsilon_u}{\varepsilon_u} \bar{\tau}_{uu} \right) q_u - F_{ul} \frac{1-\varepsilon_l}{\varepsilon_l} \bar{\tau}_{ul} q_l = (1 - F_{uu} \bar{\tau}_{uu}) \sigma T_u^4 - F_{ul} \bar{\tau}_{ul} \sigma T_l^4 - (F_{uu} \bar{\alpha}_{uu} + F_{ul} \bar{\alpha}_{ul} + F_{uF} \bar{\alpha}_{uF}) \sigma T_g^4 - F_{uF} \bar{\tau}_{uF} \sigma T_F^4 \quad (2.11)$$

當  $k=l$ ：

$$-F_{lu} \frac{1-\varepsilon_u}{\varepsilon_u} \bar{\tau}_{lu} q_u + \left( \frac{1}{\varepsilon_l} - F_{ll} \frac{1-\varepsilon_l}{\varepsilon_l} \bar{\tau}_{ll} \right) q_l = -F_{lu} \bar{\tau}_{lu} \sigma T_u^4 + (1 - F_{ll} \bar{\tau}_{ll}) \sigma T_l^4 - (F_{lu} \bar{\alpha}_{lu} + F_{ll} \bar{\alpha}_{ll} + F_{lF} \bar{\alpha}_{lF}) \sigma T_g^4 - F_{lF} \bar{\tau}_{lF} \sigma T_F^4 \quad (2.12)$$

其中， $u$ 、 $l$ 、 $g$ 、 $F$  分別代表上表面、下表面、熱空氣層及火源點。將上二式代入求解後可得到火焰釋放多少熱輻射至上平面( $q_u$ )及下平面( $q_l$ )，將釋放至其他區域的熱輻射扣除後，即可得到熱空氣層從火焰釋放之熱輻射中得到多少能量。

$$Q_g = -(A_u q_u + A_l q_l) + Q_F \quad (2.13)$$

其中  $Q_g$  為熱空氣層所得之總熱輻射量。

## 2.6.2 形狀因子之計算

形狀因子(view factor) $F_{ij}$ 被定義為從*i*表面離開之輻射有多少比例被空間中一平面*j*所攔截，從數學上相關推導如下：

當一輻射離開某平面  $dA_i$  可被表示為：

$$dq_{i \rightarrow j} = I_{e+r,i} \cos \theta_i dA_i d\omega_{j \rightarrow i}$$

其中  $I_{e+r,i}$  為離開平面  $A_i$  及反射後之輻射強度(radiosity)， $d\omega_{j \rightarrow i}$  為從  $dA_i$  看到  $dA_j$  所處之立體角度， $d\omega_{j \rightarrow i}$  可由幾何相關推導得到  $d\omega_{j \rightarrow i} = (\cos \theta_j dA_j)/R^2$ ，故：

$$dq_{i \rightarrow j} = I_{e+r,i} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{R^2} dA_i dA_j$$

假設  $I_{e+r,i}$  與角度無關則上式可簡化為：

$$dq_{i \rightarrow j} = J_i \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j$$

由形狀因子(view factor)之定義可得：

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j$$

因本研究假設火源點為一可輻射之微小圓球，上式可簡化為：

$$F_{ij} = \int_{A_j} \frac{\cos \theta_j}{4\pi R^2} dA_j \quad (2.14)$$

## 2.7 牆壁熱損失率計算

一般來說，能量之守恆必須考慮觀察範圍內的所有熱交換行為，而在上、下空氣層中需要考慮熱交換的行為，主要有熱傳遞、燃燒生成熱與隨氣體流動而被攜帶的熱損。

依據 MaCaffrey 等所推導之有效熱傳導率  $h_k$  可求得整個火災是由周圍牆壁的熱損失率  $\dot{Q}_w$ ，再經由 BRI2002 之修正其計算式如下：

$$\dot{Q}_w = h_k \times A_c \times (T - T_0) \quad (2.15)$$

i.  $h_k = \sqrt{\lambda \rho_c c / t}$  當  $(\sqrt{\lambda \rho_c c / t} < 0.015)$   
(2.25a)

ii.  $h_k = 0.015$  當  $(0.015 \leq \sqrt{\lambda \rho_c c / t})$  (2.15b)

其中  $\dot{Q}$  為火源熱釋放率 (kW)、 $A_c$  為居室有效傳熱面積 ( $m^2$ )、 $h_k$  為周圍牆壁之熱傳導率 ( $kW/m/K$ )、 $\lambda$  為牆壁之熱傳導係數 ( $kW/m/K$ )、 $\rho_c$  為牆壁之密度 ( $kg/m^3$ )、 $c$  為牆壁之等壓比熱 ( $kJ/kg/K$ )。

本計算方法由日本建築研究所之 BRI2002[26] 所驗證，並制定與其相符合之熱傳導率曲線方程式。

## 2.8 有效排煙熱損失計算

當燃燒發生時因室內壓力過大導致煙流向開口擴散，當室內壓力位於中性帶上方時，煙流會排出居室導致熱量損失。由於位於開口之中性帶高度會隨時間及壓力分布而變化，故本研究不將中性帶納入考量，所以將其視為並無從外界向室內流出之流動，因此其隨氣流流入而損失之熱能將不被考慮。

本研究考量之排煙熱損失率即為流出流體之焓變化，故將流出之質量乘以等壓比熱及溫度變化即可得到：

$$\dot{Q}_e = C_p \times m_e \times (T - T_0) \quad (2.16)$$

其中  $\dot{Q}_e$  為有效排煙熱損失率(kW)、 $C_p$  為空氣比熱(kJ/kg/K)、 $m_e$  為有效排煙率(kg/s)。

## 2.9 煙層溫度計算

由上述相關文獻及半經驗公式，吾人取煙層為控制體積分析邊界層之能量進出得到以下初步結果：

$$\frac{d}{dt}(C_p \rho_s V_s T_u) = \dot{Q}_g - \dot{Q}_w - \dot{Q}_e + \dot{Q}_p \quad (2.17)$$

其中  $\dot{Q}_g$  為煙層吸收之熱輻射量(kW)、 $\dot{Q}_w$  為牆壁熱損失率(kW)、 $\dot{Q}_e$  為有效排煙熱損失率(kW)、 $\dot{Q}_p$  為煙生成質量所產生之能量(kW)、 $t$  為時間(sec)、 $T_u$  為煙層溫度(K)、 $V_s$  為煙層體積( $m^3$ )。將上述公式積分求取煙層厚度，推導結果如下所式：

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(C_p \rho_s V_s T_u) &= \dot{Q}_g - \dot{Q}_w - \dot{Q}_e + \dot{Q}_p \\ C_p \rho_s V_s T_u &= \int_0^t (\dot{Q}_g - \dot{Q}_w - \dot{Q}_e + \dot{Q}_p) dt \\ T_u &= \frac{1}{C_p \rho_s V_s} \int_0^t (\dot{Q}_g - \dot{Q}_w - \dot{Q}_e + \dot{Q}_p) dt \end{aligned} \quad (2.18)$$

上述公式即為計算煙層溫度之統御方程式，透過煙層吸收之熱輻射量及牆壁熱損失率有效排煙熱損失率煙生成質量所產生之能量與時間之變化關係帶入上式，即可求得煙層溫度。

## 2.10 煙層密度計算

當上方氣體層之溫度隨時間而上升時，將會造成氣體密度隨之變化。當氣體密度越小時，氣體流動之速度將會隨之增快；相反地，氣體流動之速度將會減小。但對排煙而言，一般風機排煙能力是以單位時間內排放多少氣體體積為設計之單位，因此當氣體密度隨溫度上升而變小時，將會造成單位時間內之排煙質量變小。

由理想氣體方程式推導，可得到煙層密度之計算公式如下：

$$\rho_s = \frac{353}{T} \quad (2.19)$$

## 2.11 煙層厚度計算

由上述相關文獻及半經驗公式，故取煙層為控制體積分析邊界層之質量進出得到以下初步結果：

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_s) = \dot{m}_p - \dot{m}_e$$

其中  $\dot{m}_p$  為煙生成率( $\text{kg/s}$ )、 $\dot{m}_e$  為居室有效排煙率( $\text{kg/s}$ )、 $\rho_s$  為煙層密度( $\text{kg/m}^3$ )、 $V_s$  為居室樓地板體積( $\text{m}^3$ )。將上述公式積分求取煙層厚度，推導結果如下所式：

$$\begin{aligned} \rho_s V_s &= \int_0^t (\dot{m}_p - \dot{m}_e) dt \\ \rho_s Z_s A &= \int_0^t (\dot{m}_p - \dot{m}_e) dt \\ Z_s &= \frac{1}{\rho_s} \int_0^t \frac{(\dot{m}_p - \dot{m}_e)}{A} dt \end{aligned} \quad (2.20)$$

上述公式即為計算煙層厚度之統御方程式，透過煙生成率及排出率與時間之變化關係帶入上式，即可求得煙層厚度。

有別於「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」之計算方法，為了更精確的計算小居室煙層下降高度，本研究不採用

直接簡易的計算，而採用考慮煙層密度且使用煙生成率扣掉居室有效排煙率之積分，來預測煙層下降之行為。但因實際上有些場所之煙生成率扣掉居室有效排煙率為負值，所以在計算煙生成率扣掉居室有效排煙率設定最小值為 0.00001 (kg/s)。

## 2.12 煙層高度計算

由(2.20)式之計算結果可得知該時刻之煙層厚度，而扣除居室中煙層厚度即可得到可避難逃生之高度，此高度即為煙層高度。煙層高度之計算式如下：

$$H - Z_s = Z_{up} + Z_{down} = Z \quad (2.21)$$

其中  $H$  為居室天花板高度(m)、 $Z_s$  為頂層煙層厚度(m)、 $Z_{up}$  為夾層上方至煙層之高度(m)、 $Z_{down}$  為夾層下方至地之高度(m)。

上式煙層高度達到避難障礙煙層高度 1.8 公尺時，即為該高度上方煙霧蓄積之可能容許量。從避難者所在樓面算起的煙層高度，其高度基準位置為居室樓面之最高位置， $H$  為居室天花板高度，可利用煙霧下降至 1.8 公尺的時間，計算出場所之煙層下降時間。

## 2.13 簡易二層法解題程序

本研究解題程序如下：

- a. 利用已知之各項物理初始條件代入方程式；
- b. 設定相關之邊界條件；
- c. 以簡易二層方法之計算流程進行程式運算；
- d. 重複步驟 c，直至達到下列的收斂標準。

煙層高度

$$\left| \frac{Z_s^{n+1} - Z_s^n}{Z_s^{n+1}} \right| < 1 \times 10^{-5}$$

煙層溫度

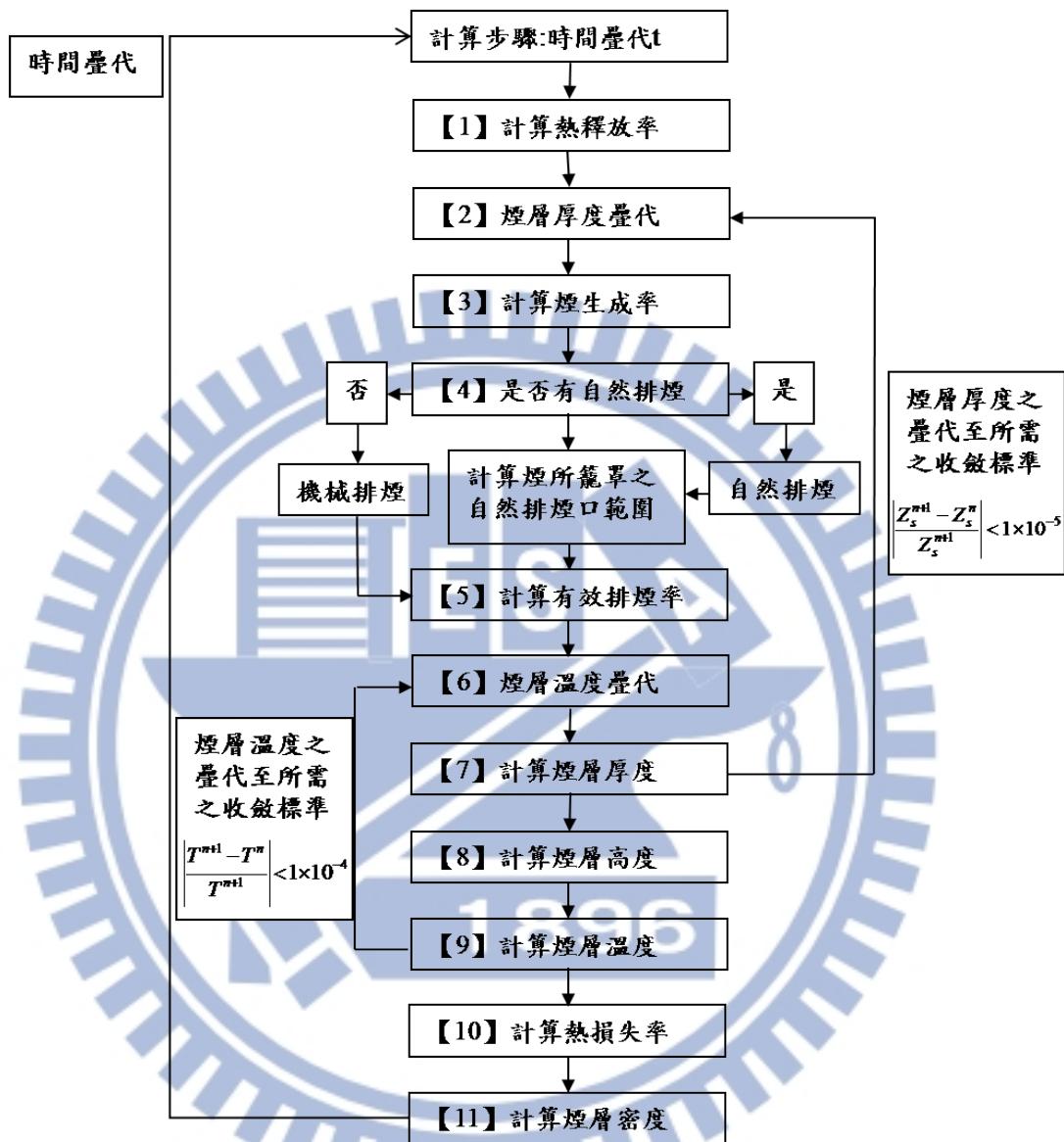
$$\left| \frac{T^{n+1} - T^n}{T^{n+1}} \right| < 1 \times 10^{-4}$$

其中 n 代表疊代次數

## 2.14 C++ 撰寫

本研究為了更精確地描述各參數對煙層高度之影響並計算避難安全，故撰寫一 C++ 程式，使用嚴謹的 C++ 程式語言，並以嚴苛之收斂條件要求，計算流程符合表 2-4 之計算步驟。配合簡易二層方法之計算流程，讓小居室煙層分析研究更精準掌握各項參數便可模擬之。

表 2-4 簡易二層方法之計算流程



## 第三章 模擬軟體介紹

### 3.1 火災模擬軟體(FDS)

FDS(Fire Dynamics Simulator)為美國國家標準與科技研究所(National Institute of Standard and Technology ; NIST)所研發之模擬火場計算軟體。於西元 2000 年 2 月公開發表第一版，現於西元 2010 年 10 月公開發表第五版 (5.5.3 版)。

FDS 可以計算三維空間火災行為(包含火場之溫度、煙氣流動速度、軌跡)，其計算運作方式是先將整個空間分割成許多細小的格點，再以質量、動量、能量、燃燒與熱傳守恆等統御方程式下去求解。且經由後處理程式 Smokeview 將流場依靜態與動態之方式可視化輸出，後處理軟體 Smokeview 亦於西元 2010 年 10 月公開發表第五版 (5.6 版)。FDS 更可以將建築物內之煙控系統，撒水頭等消防設備實際需求納入模型中，以更符合現場之狀況，也因此被廣泛應用於學術研究和工程界上。

FDS 使用上必須先將模擬之幾何形狀、材料特性、火源大小、排煙設備、補氣口、大氣溫度、模擬時間以及邊界條件等...以固定之格式輸入至一文字檔(\*.data)，再由 FDS 軟體開始計算，由於 FDS 本身並沒有將流場可視化之功能，故需要再利用 Smokeview 軟體來讀取 FDS 所計算出之數據來做進一步的分析與探討。圖 3.1 為 FDS 流程圖，圖 3.2 為 FDS 與 Smokeview 之組織架構。

FDS 所使用之數值方法與其主要的統御方程式如以下所介紹。

#### 3.1.1 流體力學之統御方程式

##### 1 質量守恆

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad (3.1)$$

其中  $\rho$ ：流體密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$u$  : 流體速度 (m/s)

$t$  : 時間 (s)

## 2 動量守恆

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + f + \nabla \cdot \tau \quad (3.2)$$

其中  $p$  : 壓力 (nt/m<sup>2</sup>)

$g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$f$  : 外力 (包含撒水頭之拖曳力) (nt/m<sup>3</sup>)

$\tau$  : 黏滯剪應力張量 (nt/m<sup>2</sup>)

## 3 能量守恆

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h u - \frac{DP}{Dt} = Q - \nabla \cdot q'' + \nabla k \nabla T + \nabla \cdot \sum_{\ell} h_{\ell} (\rho D)_{\ell} \nabla Y_{\ell} \quad (3.3)$$

其中  $\frac{DP}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \cdot \nabla P$  (質量導數)

$h$  : 焓 (kJ/kg)

$Q$  : 热釋放率 (kw)

$q''$  : 輻射熱通量 (kw/m<sup>2</sup>)

$k$  : 热傳導係數 (kw/mk)

$T$  : 溫度 (°C)

$h_{\ell}$  :  $\ell$  物種之焓值 (kJ/kg)

$D$  : 擴散係數 (m<sup>2</sup>/s)

$Y_{\ell}$  :  $\ell$  物種之質量分率

#### 4 物種守恆

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_\ell) + \nabla \cdot (\rho Y_\ell \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D)_\ell \nabla Y_\ell + \dot{W}_\ell''' \quad (3.4)$$

其中  $\dot{W}_\ell'''$  :  $\ell$  物種單位體積生成率

#### 5 狀態方程式

$$P = P_o - \rho_\infty g Z + \tilde{P} \quad (3.5)$$

對低馬赫數流而言

$$P_o = \rho T R \sum \left( Y_i / M_i \right) = \rho T R / M \quad (3.6)$$

其中

$P_o$  : 外界壓力 ( $\text{nt/m}^2$ )

$\rho_\infty g Z$  : 靜壓 ( $\text{nt/m}^2$ )

$\tilde{P}$  : 摾動壓力 ( $\text{nt/m}^2$ )

#### 6 擴散 LES(Large Eddy Simulation)模型

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 \left( 2(\text{def } \vec{u}) \cdot (\text{def } \vec{u}) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u})^2 \right)^{1/2} \quad (3.7)$$

其中  $C_s$  : 經驗常數

$\Delta$  : 格點長度

$$\Phi \equiv \tau \cdot \nabla \vec{u} = \mu \left( 2(\text{def } \vec{u}) \cdot (\text{def } \vec{u}) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u})^2 \right)$$

$$= \left\{ 2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \right\}$$

$$- \left\{ \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

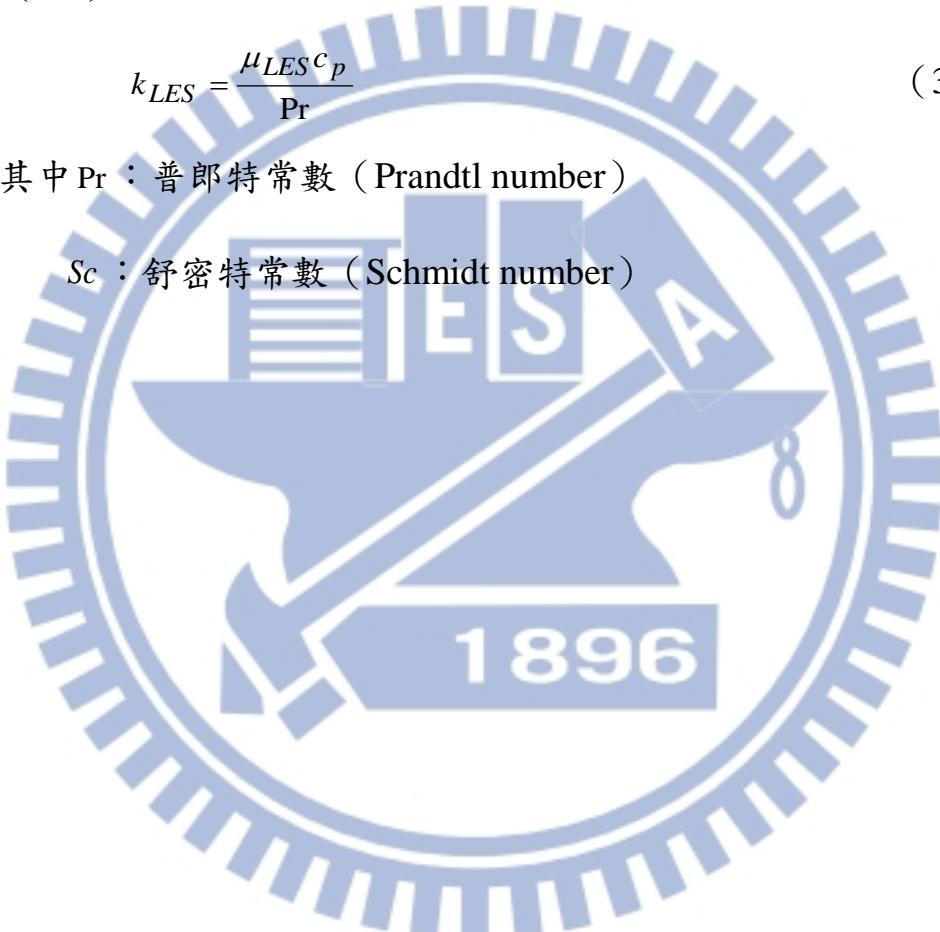
$$\text{定義} \quad (\rho D)_{l,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc}$$

( 3.8 )

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr} \quad ( 3.9 )$$

其中  $Pr$  : 普郎特常數 ( Prandtl number )

$Sc$  : 舒密特常數 ( Schmidt number )



### 3.1.2 差分方程式

#### 1. 時間之離散

對時間項的離散，FDS 採用 Second order predictor-corrector scheme。在每個 time-step 開始的時候， $\rho^n$ 、 $Y_i^n$ 、 $\bar{u}^n$ 、 $H^n$  與  $p_0^n$  均為已知，需特別注意的是，上標  $(n+1)_e$  代表的是第  $(n+1)$  個 time-step 時程式預估出來的值。

a. 热物理性質  $\rho$ 、 $Y_i$  和  $p_0$  是利用顯性的尤拉法 (explicit Euler step)

得到，例如密度可由下式預估

$$\rho^{(n+1)_e} = \rho^n - \delta t (\bar{u}^n \cdot \nabla \rho^n + \rho^n \nabla \cdot \bar{u}^n) \quad (3.10)$$

b. 解壓力的 Poisson 方程式則可由

$$\nabla^2 H^n = -\frac{(\nabla \cdot \bar{u})^{(n+1)_e} - (\nabla \cdot \bar{u})^n}{\delta t} - \nabla \cdot \bar{F}^n \quad (3.11)$$

$\bar{F}$  這一項包含了動量方程式裡得對流、發散及外力項。速度則由

下個 time-step 預估

$$\bar{u}^{(n+1)_e} = \bar{u}^n - \delta t (\bar{F}^n + \nabla H^n) \quad (3.12)$$

而 time-step 必須符合

$$\delta t < \min\left(\frac{\delta x}{u}, \frac{\delta y}{v}, \frac{\delta z}{w}\right) \quad (3.13)$$

c. 前述兩者算完之後，熱物理性質  $\rho$ 、 $Y_i$  和  $p_0$  將在下一個 time-step 做校正。例如密度將寫成

$$\rho^{n+1} = \frac{1}{2} \left( \rho^n + \rho^{(n+1)_e} - \delta t (\bar{u}^{(n+1)_e} \cdot \nabla \rho^{(n+1)_e} + \rho^{(n+1)_e} \nabla \cdot \bar{u}^{(n+1)_e}) \right) \quad (3.14)$$

d. 透過之前預估出來的結果來重新計算壓力

$$\nabla^2 H^{(n+1)_e} = -\frac{2(\nabla \cdot \bar{u})^{n+1} - (\nabla \cdot \bar{u})^{(n+1)_e} - (\nabla \cdot \bar{u})^n}{\delta t} - \nabla \cdot \bar{F}^{(n+1)_e} \quad (3.15)$$

更正過的速度如下：

$$\bar{u}^{n+1} = \frac{1}{2} \left[ \bar{u}^n + \bar{u}^{(n+1)_e} - \delta t (\bar{F}^{(n+1)_e} + \nabla H^{(n+1)_e}) \right] \quad (3.16)$$

2. 空間之離散

所有空間項的離散皆採用二階中央差分法 (Second order central difference)。整個計算的範圍是一個被長方體格點分割的長方體。每個格點裡面，用  $i$ 、 $j$  和  $k$  分別代表格點的  $x$ 、 $y$  及  $z$  方向。所有線性的量 (如密度) 都是在格點的中心給定，例如  $\rho_{ijk}^n$  代表的是第  $n$  個 time-step 格點  $i$ 、 $j$ 、 $k$  裡的密度。向量的值則是在格點的表面給定。

3. 收斂條件

FDS 軟體在數值計算方法上，主要採 LES (Large Eddy Simulation 大尺度渦流模擬方法) 模式進行計算。對計算疊代時間 (time step)，程式會根據 CFL 穩定條件 (Courant-Friedrichs- Lewy condition) 與 VN 穩定條件 (Von-Neumann condition)，依據計算所得之速度數值與物理量，自動進行疊代時間  $\delta t$  (time step) 之調整，使計算過程中之 CFL 數與 VN 數均介於 0.8 至 1 之間，以達到數值方法的計算之收斂。

$$CFL = \delta t \max \left( \frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z} \right) \quad (3.17)$$

$$VN = 2 \max \left( v \cdot D \cdot \frac{k}{\rho C_p} \right) \delta t \left( \frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} + \frac{1}{\delta z^2} \right) \quad (3.18)$$

$\delta t$ ：疊代時間 (time step)

$u$ 、 $v$ 、 $w$ ：速度分量

$\delta x$ 、 $\delta y$ 、 $\delta z$ ：網格大小

V : 黏滯係數(viscosity)

D : 擴散係數(diffusivity)

$k/\rho c_p$  : 热導率(thermal conductivity)

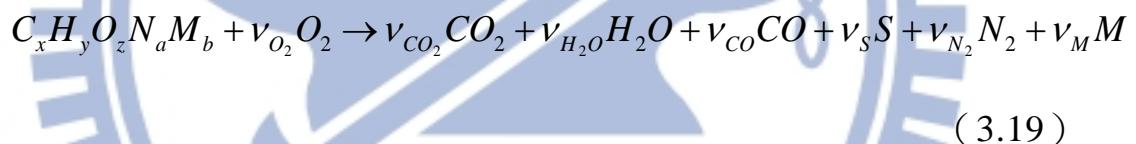


### 3.1.3 燃燒模式

FDS 中提供混合比燃燒模式( Mixture Fraction Combustion Model; MFCM )及有限速率反應模式，主要差別在於 MFCM 是以燃料耗率之原理來計算熱釋放率，有限速率反應模式則是使用有限速率化學反應方程式來描述燃燒之化學反應。

在混合比燃燒模式( Mixture Fraction Combustion Model; MFCM )中，燃料與氧氣混合立即燃燒不一定是個合理的假設，例如在有通風限制的居室環境下，氧氣逐漸消耗的同時，燃燒所產生之反應物也不盡相同，故定義多個混和分率使燃料消耗與生成物產生關聯。對應不同情境下，燃燒模式分為單步反應(single-step reaction)和兩步反應(two-step reaction)。

#### 1. 單步反應(single-step reaction)



其中  $V_i$  :  $i$  分子化學反應當量係數

$$\text{定義 } z = \frac{sY_F - (Y_o - Y_o^\infty)}{sY_F^I + Y_o^\infty} ; \quad s = \frac{\nu_o M_o}{\nu_F M_F} \quad (3.20)$$

其中  $Y_o^\infty$  : 氧氣於大氣中之質量分率

$Y_F^I$  : 燃料之質量分率

$M_i$  :  $i$  分子之分子量

Z 的函數中也包含了燃料與其燃燒後產物之質量分率：

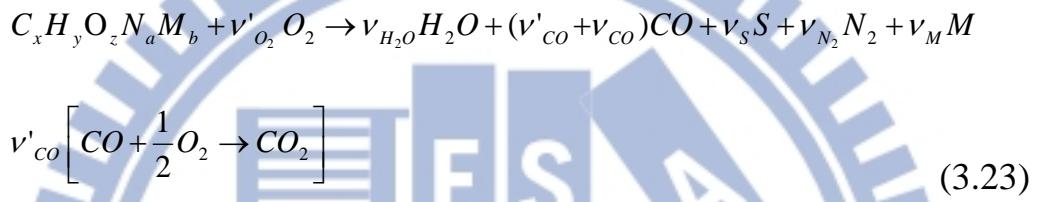
$$Z = \frac{1}{Y_F^I} (Y_F + \frac{W_F}{xW_{CO_2}} Y_{CO_2} + \frac{W_F}{xW_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{xW_S} Y_S) \quad (3.21)$$

在此模式中假設，當燃料與氧同時存在同一空間時，便隨即產生化學反應，因此火焰面 $(Z_f)$ 可定義為：

$$Z(x,t) = Z_f ; Z_f = \frac{Y_o^\infty}{sY_F^I + Y_o^\infty} \quad (3.22)$$

## 2. 兩步反應(Two-step reaction)

在通風限制條件下之火災，氧氣濃度會隨著時間逐漸下降，燃料與氧氣的反應物不再固定，瞬間反應之假設也不再合理，故將燃燒模型修改如下式：



其中  $\nu'_{CO}$  為可能與氧氣發生反應之數量

$\nu_{CO}$  為在氧氣充足的情形下所生成之一氧化碳之數量

為了描述物種的組成，將混合分率(Z)分為：

$$Z_1 = \frac{Y_F}{Y_F^I} \quad (3.24)$$

$$Z_2 = \frac{W_F}{[x - (1 - X_H) \nu_s] W_{CO}} \frac{Y_{CO}}{Y_F^I} \quad (3.25)$$

$$Z_3 = \frac{W_F}{[x - (1 - X_H) \nu_s] W_{CO_2}} \frac{Y_{CO_2}}{Y_F^I} \quad (3.26)$$

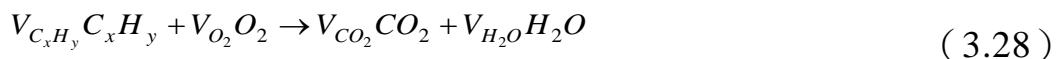
使用上三式來推出其他物種之質量分率。

而燃燒反應之熱釋放率 $\dot{q}'''$ 則由燃料消耗率求得

$$\dot{q}''' = \Delta H_F \dot{m}_F''' \quad (3.27)$$

其中  $\Delta H_o$  代表單位質量之氧消耗時之熱釋放率。

以上為混合比燃燒模式在計算熱釋放率之原理，至於在有限速率反應模式中則是以下列方程式表示之。



其化學反應速率以單一步驟之反應式表之，藉此求得熱釋放率。

$$\frac{d[C_xH_y]}{dt} = -B[C_xH_y]^a[O_2]^b e^{-E/RT} \quad (3.29)$$

其中  $B$ ：反應常數( pre-exponential factor for arrhenius reaction )

$E$ ：活化能 (kJ/mol)

1896

### 3.1.4 热辐射之统御方程式

FDS 之热辐射传统御方程式如下所示：

$$s \cdot \nabla I_n(x, s) = k_n(x) [I_{b,n}(x) - I(x, s)], \quad n = 1, \dots, N \quad (3.30)$$

其中  $I_{b,n} = F_n(\lambda_{\min}, \lambda_{\max}) \sigma T^4 / \pi$  (3.31)

$$I \cdot (x, s) = \sum_{n=1}^N I_n(x, s) \quad (3.32)$$

$I$  : 辐射热强度 (kw/m<sup>2</sup>)

$k$  : 吸收係數

$\lambda$  : 波長 (m)

$\sigma$  : 史蒂芬-波兹曼 ( Stefan-Boltzman constant )

對於牆面之热辐射，FDS 採用之邊界條件如下：

$$I_w(S) = \epsilon I_{bw} + \frac{1 - \epsilon}{\pi} \int_{S' \cdot nw < 0} I_w(S') |S' \cdot nw| d\Omega \quad (3.33)$$

其中  $I_w$  : 牆面之辐射热强度 (kw/m<sup>2</sup>)

$S$  : 單位向量

$\epsilon$  : 放射率

$I_{bw}$  : 牆面黑體辐射强度 (kw/m<sup>2</sup>)

上述统御方程經有限體積法轉換後，再經由假設任一隔面之辐射强度相同，便可得知辐射热通量。

$$q_r(x) = \int S I(x, s) d\Omega \quad (3.34)$$

因此能量守恒方程式中辐射热之大小可以下式表之：

$$-\nabla \cdot q_r(x) = K(x)[U(x) - 4\pi I_b(X)], U(x) = \int_{4\pi} I(x, s) d\Omega \quad (3.35)$$



### 3.1.5 邊界條件

FDS 中提供四種型態之邊界條件供使用者作選擇：1.絕熱、2.特定溫度（溫度可為時間之函數）、3.熱薄型燃料模式及 4.熱厚型燃料模式。

根據所計算出邊界吸收或放出的熱量，配合不同材料裂解之模式，敘述各種相異邊界因受熱所產生的化學變化，再進一步計算其對模擬空間所造成的影响。

在 LES 計算模式中

$$\dot{q}_c'' = h\Delta T ; h = \max \left[ C|\Delta T|^{1/3}, 0.037 \frac{K}{L} \left( \frac{|U|L}{V} \right)^{0.8} P_r^{1/3} \right] \quad (3.36)$$

$\Delta T$ ：邊界與氣態分子間之溫差( $^{\circ}\text{C}$ )

$C$ ：自然對流係數(經驗常數，此模式中預設在水平面時  $C = 1.43$ ，

垂直面  $C = 0.95$  ) ( $\text{kw/m}^2$ )

$L$ ：特徵長度 (m)

$V$ ：動黏滯係數 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

1. 热厚型固態燃料，其統御方程如下：

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} ; -k_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(0, t) = \dot{q}_c'' + \dot{q}_r'' \quad (3.37)$$

其中  $\rho_s$ ：固態燃料密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_s$ ：固態燃料比熱 ( $\text{kJ/kg}\cdot\text{k}$ )

$\dot{q}_c''$ ：對流熱通量 ( $\text{kw/m}^2$ )

$\dot{q}_r''$ ：輻射熱通量 ( $\text{kw/m}^2$ )

$T_s$ ：固態燃料溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

## 2. 热薄型固态燃料 (假设温度在垂直固态燃料方向为均匀分布)

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{q}_c'' + \dot{q}_r''}{\rho_s C_s \delta} \quad (3.38)$$

其中  $\delta$  : 固态燃料厚度(m)

## 3. 液态燃料

燃烧时液体燃料蒸发，此现象为一函数，且与温度与蒸气浓度有关。当液体表面蒸气之分压等於 Clausius-Clapeyron 壓力时，将达平衡状态。

$$p_{cc} = p_0 \exp \left[ -\frac{h_v M_f}{\mathfrak{R}} \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) \right] \quad (3.39)$$

其中  $h_v$  : 蒸发热

$M_f$  : 分子重

$T_s$  : 表面温度

$T_b$  : 燃料沸腾温度

對於以上 FDS 之統御方程式，在其離散化過程中，時間之處理採用 Second Order Predictor-corrector Scheme；空間項則採用 Second Order Finite Differences。燃燒模式、熱輻射模式以及邊界條件上的計算上皆採用大渦流模擬法( Large Eddy Simulation, LES )計算方法，LES 法是將流體物理量區分為大尺度( grid-scale )及次網格尺度( sub-grid scale, SGS )兩部份。對於大尺度的物理量在 LES 中直接由 Navier-Stokes 方程式求解；而在次格點尺度內的物理量，將小於網格尺寸之漩渦或紊流以次網格紊流模式( Sub-grid Turbulence Model )表示，並直接計算流場暫態變化。另依方面 FDS 亦提供了 DNS 之計算

方法，但由於 DNS 法需大量實驗資料作驗證而在計算上同時也需要相當龐大之硬體設備。因此為符合學術上與工程上之實用性與經濟效應，本研究採用 FDS 技術手冊上建議使用之 LES 模式。



### 3.2 模型建立軟體 PyroSim

PyroSim 是一個互動式模型建立軟體作為火災動力學計算軟體 (FDS) 之前處理軟體。此套件模軟體提供即時的回饋並確保輸入 FDS 之文件格式正確。建模時可以任意切換公制單位模式或英制單位模式。PyroSim 提供二維和三維模型建立功能，並可使用旋轉、複製、移動等等功能簡化空間建立之程序。

現代建築外觀的多樣化及量體的大型化增加了分析者建立模型之難度，為了能有效提高分析者運用 FDS 之效率，使用可視化之建模軟體創建空間之模型並設定空間之邊界條件，除了可降低建模之困難度，亦可減少分析者在空間建立及邊界條件設定發生錯誤之可能，或是在第一時間即可進行修正。

以下介紹建模之步驟順序

#### 1. 網格劃分(Meshes)

透過 Meshes 可將所建之模型劃分網格，就網格大小可分為單一網格(Uniform Meshes)及非單一網格(Nonuniform Meshes)，在較為龐大之模型內使用單一網格易造成網格數過多導致運算時間過長或是無法分析之情形，當網格數目過多但放大網格大小又會導致計算結果誤差過大之情況下，建議使用非單一網格，將模型切割為多個空間，在各空間以不同大小之網格進行劃分，一般以火源附近區域使用最小之網格，而向外區域則可略為放大。

#### 2. 建立幾何外觀(Obstruction)

在 PyroSim 繪圖的介面中，可透過直接建立 3D 模型或是透過 2D 分別繪製各樓層空間幾何，在 2D 的建構模式中，可匯入建築平面圖

做為考，可支援之檔案格式如 bmp, dxf, gif, jpg, png, tga, 及 tif，複雜之建築空間以 2D 方式進行較為快速。

### 3. 表面性質設定(Surface)

此步驟用於定義固體(solid)以及通風口(vent)之性質，在此，固體表面可定義熱傳導、或是燃燒性質；通風口則可定義風速或溫度等性質。

### 4. 消防排煙設備設置(Devices)

建模過程中可依建築設計建立撤水設備、火警探測器以及機械排煙設備，前兩項均屬設備(device)之設定，而機械排煙設備則以通風口(vent)進行設定，其中火警探測器目前具有連動其他設備之功能，此功能亦大為提升模擬之真實度。

### 5. 量測點設置(Devices)

運用 FDS 計算之前，分析者須先由建築模型判斷模擬空間內何處具有重要之分析結果，如 CO、溫度、能見度、熱輻射及速度場等，由事前之規劃，模型建立時即進行量測點設置，量測點對於不同之量測對象可分氣體及固體之量測點(gas phase and solid phase device)，在量測點設置處可獲得對應時間之量化數據。

### 6. 初始條件設定

模型空間內之初始環境條件亦可在 PyroSim 平台設定，初始條件一般以設定環境溫度為主。

### 7. 邊界條件設定

模型之邊界條件設定即為重要，在建築空間開口部以及外氣是否有速度場之存在均應詳細考慮以進行設定，對於與外氣連通或是自然風影響均可透過通風口(vent)進行設定。

## 8. 計算條件設定(Simulation parameter)

在此設定模型運用 FDS 計算之時間及求解方法，運算時間以秒為單位，而求解方法可選擇 Large Dddy(LDS)或是 Direct Numerical(DNS)，此兩方法之不同處於可參閱前一節。



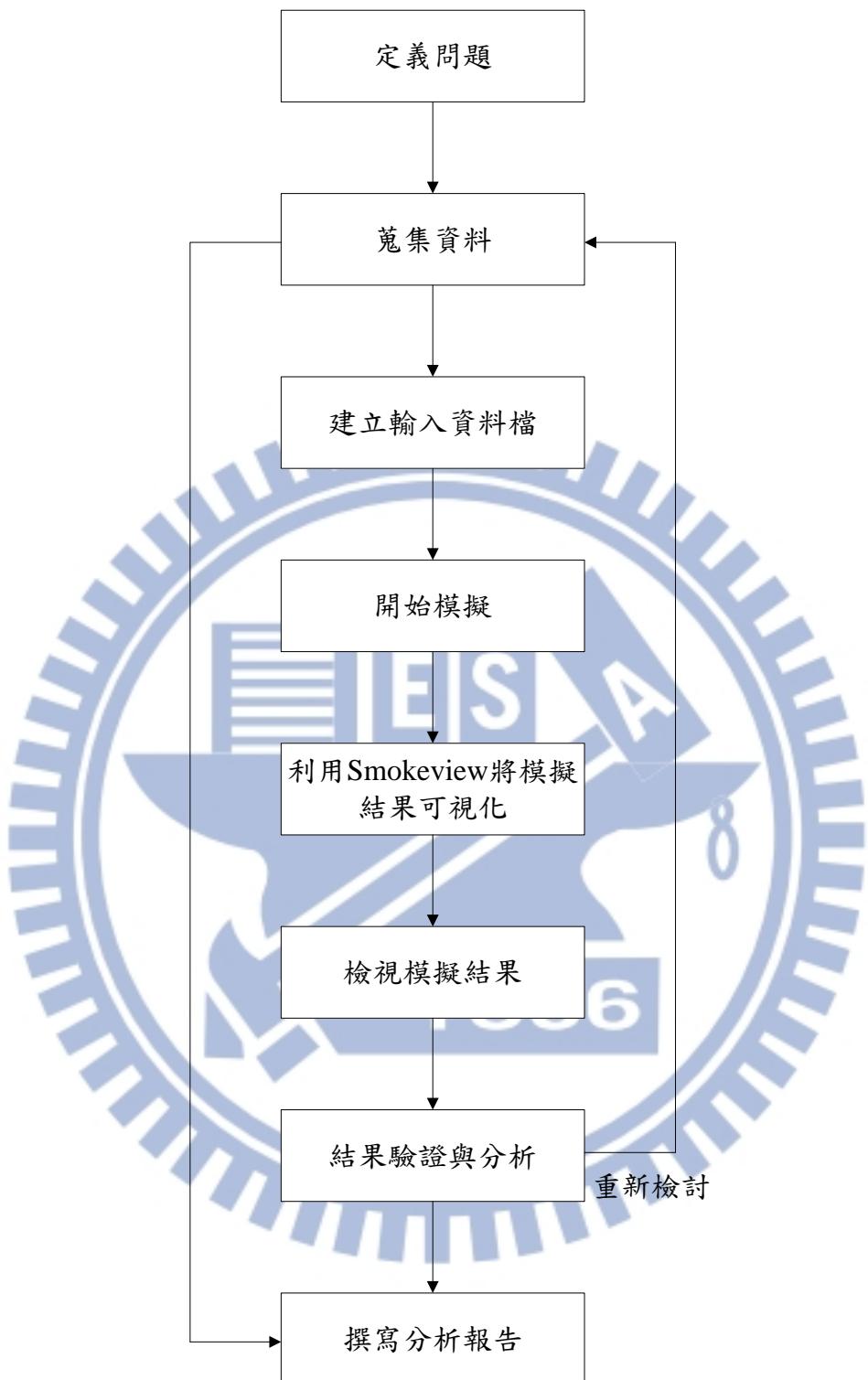


圖 3.1 FDS 分析執行計畫流程圖

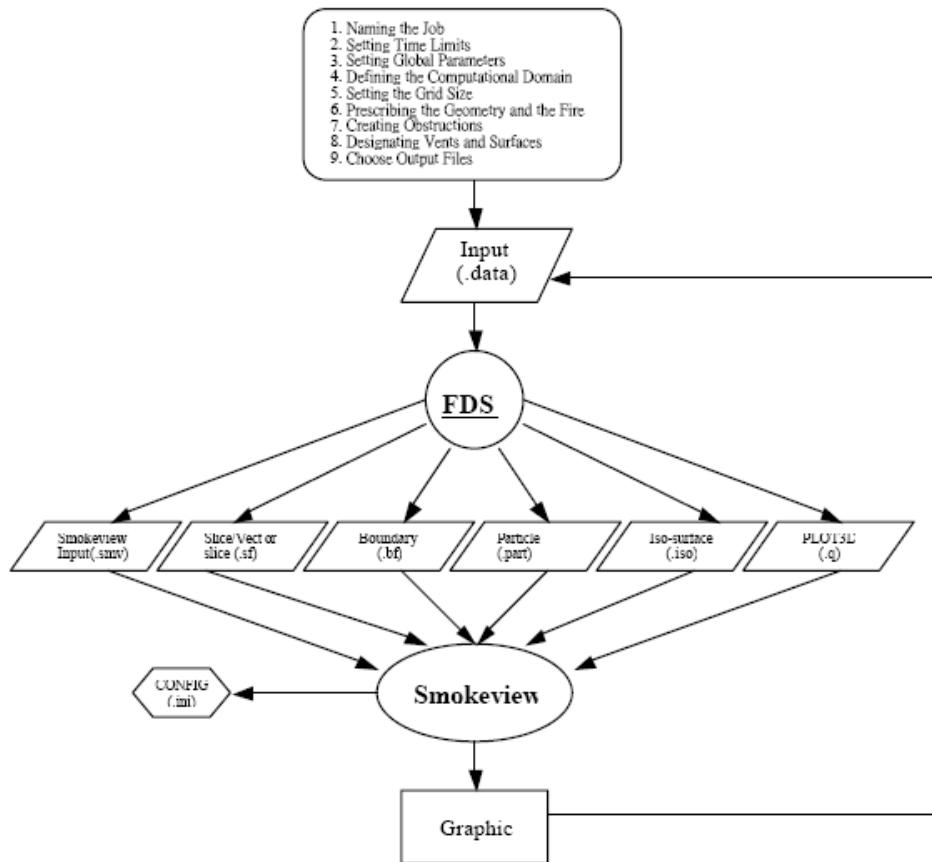


圖 3.2 FDS 與 Smokeview 之組織架構與工作流程圖

## 第四章 結果與討論

### 4.1 前言

本研究主要目的為居室火災發生時分析煙層發展之趨勢進行研究，研究流程如圖 1.2 所示。透過撰寫之程式與運用模擬軟體 FDS 及相關實驗文獻之各種數據將於本章做比較來確認簡易二層法之正確性，並探討於火場內建築物在熱輻射與樓板夾層之考量下，對煙層溫度分佈與煙層下降之影響。

### 4.2 簡易二層法適用範圍及人員安全判斷標準

由於一般小型居室較為封閉且可能存在大火載量，又為一般民生生活必要之居所，在災害防治上有其重要性，本研究以一般居家規模大小為考量，故面積不超過  $200m^2$ ，天花板限制在 8m 以下。

除了以上限制外，因本研究考慮為一般民生居室，故建築物本身必須為防火建築物且不適用高火載量及可能快速延燒之場所。除了排煙相關設施外，不考量其他滅火設備動作之影響。

火場中所產生的有毒氣體含有相當多的刺激性與痙攣性成份，則容易導致人員吸入過多有毒氣體而昏迷、休克，嚴重的話甚至會導致死亡。在防火安全工程的 SFPE Handbook 中有詳細的規定，而紐西蘭設計指針的危險指標即是參考 SFPE Handbook 制定如表 4.1 所示。

表 4.1 人體承受危害程度指標值分析表(SFPE 及紐西蘭設計)

危害類型	承受極限
熱對流	氣流層溫度 $\leq 65^{\circ}\text{C}$ (不能超過 30 分鐘以上的暴露時間)
煙吸光率	在煙層下能見度不能低於 2 公尺
毒性	$\text{CO} \leq 1500\text{ppm}$ $\text{CO}_2 \leq 5\%$ $\text{HCN} \leq 80\text{ppm}$ $\text{O}_2 \geq 12\%$ (以上氣體濃度範圍一般僅能承受 30 分鐘以下)

熱輻射	上層的輻射流 $\leq 2.5 \text{ kW/m}^2$ (承受時間 20 秒以下)
-----	--

依據以上 SFPE Handbook 及內政部建築研究所出版之「大空間建築火災性能式煙設計與應用手冊」中所建議，針對 CO、溫度、能見度以及熱輻射量制訂出在人員全部完成逃生避難之前建築物內之性質需維持一定的條件如表 4.2 所示。本研究係依據此人員逃生安全環境要求之第 1、5 項來探討居室內煙層溫度及煙層高度之變化。

表 4.2 建議人員逃生安全環境要求

項目	建議人員逃生安全環境要求 (1.8m 高度逃生路徑空間內)
1	逃生環境氣體溫度 $< 60^\circ\text{C}$
2	CO 濃度 $< 1500 \text{ ppm}$
3	能見度 $> 10 \text{ m}$
4	輻射熱 $< 2.5 \text{ kW/m}^2$
5	煙層高度 $> 1.8 \text{ m}$

### 4.3 本研究之簡易二層法版本歷程介紹

本節將介紹本研究室於西元 2006 發展第一版簡易二層法(Version 1)至今第四版簡易二層法(Version 4)各版本更新之功能介紹，其目的為比較本研究之第四版簡易二層法與其他版本之差別。

表 4.1 本研究室各簡易二層法版本之功能

版本	Version 1(95年)	Version 2(101年)	Version 3(102年)	Version 4(本研究)
機械排煙	√	√	√	√
自然排煙	—	√	√	√
熱輻射	—	—	√	√
居室夾層	—	—	—	√

- 第一版簡易二層法(Version 1, 2006 年):

由於小居室空間於「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」進行居室避難安全性能驗證時，其判斷煙層下降結果過於嚴苛，不堪合理性，故本研究室於 2006 年發展第一版本簡易二

層法驗證應用技術，並依據法規訂定本簡易二層法驗證技術之適用範圍。此應用技術係於電腦中建立模擬程式，並寫成視窗化介面以便使用者操作，減少操作上的複雜與困難度，讓無專業背景之使用者也可方便使用。第一版簡易二層法主要係加入居室之機械排煙技術，其亦分析在不同 Time Step (1 秒、0.01 秒、0.0001 秒)之比較，結果發現於 0.01 秒時誤差小於百分之一，為使運算更加快速，故選用 0.01 秒進行本程式之模擬時間間格。

第一版簡易二層法(Version 1, 2006 年)之數學模式:

質量守恆:  $\frac{d}{dt}(\rho_s V_s) = \dot{m}_s - \dot{m}_e$

能量守恆:  $\frac{d}{dt}[C_p \rho_s V_s (T - T_0)] = \dot{Q} - \dot{Q}_w$

此版本簡易二層法數學模式於質量守恆之排煙率  $\dot{m}_e$  僅有機械排煙之功能，能量損失僅考量牆壁之熱傳導  $\dot{Q}_w$ ，很明顯缺乏機械排煙啟動時所帶走之熱量，因此在下一版本中作了相關修正。

- 第二版簡易二層法(Version 2, 2011 年):

此版本增加了自然排煙功能模組，使此驗證技術擴展至兩種排煙功能，自然排煙量公式係依據目前「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」提供之排煙量作設置，其排煙量公式 E 如下:

$$\dot{m}_e = \frac{\rho_s E}{60}$$

$$E = \min(\sum e) = \min \left( \sum \max \left\{ 19A_s \sqrt{h_s}, \frac{76A_s \sqrt{H_c - 1.8}}{\sqrt{1 + \left( \frac{\sum A_s}{\sum A_a} \right)}} \right\} \right)$$

第二版簡易二層法(Version 2, 2011 年)之數學模式:

質量守恆:  $\frac{d}{dt}(\rho_s V_s) = \dot{m}_s - \dot{m}_e$

能量守恆:  $\frac{d}{dt}[C_p \rho_s V_s (T - T_0)] = \dot{Q} - \dot{Q}_w - \dot{Q}_e$

此版本簡易二層法數學模式於質量守恆部分與第一版相同，為了使煙層下降速度與溫度預測更為準確，於能量損失部分比第一版多考量了排煙口所帶走之熱損失能量  $\dot{Q}_e$ 。

- 第三版簡易二層法(Version 3, 2012 年):

此版本簡易二層法對前版自然排煙技術作進一步之改良，於自然排煙口計算方法加入孔口係數  $C_A$  作自然排煙口參數之修正，使本簡易二層法排煙量更符實際排煙狀況。另亦以參酌軟體 CFAST V.6 相關文獻 Chen Xiaojun [28] 之熱輻射損失項之考量，將原火源之功率乘以  $1/3$  作為熱輻射損失量之估算。此本版之數學模式:

質量守恆:  $\frac{d}{dt}(\rho_s V_s) = \dot{m}_s - \dot{m}_e$

能量守恆:  $\frac{d}{dt}[C_p \rho_s V_s (T - T_0)] = \dot{Q} - \dot{Q}_w - \dot{Q}_e - \dot{Q}_g$

簡化→  $\frac{d}{dt}[C_p \rho_s V_s (T - T_0)] = \dot{Q} - \dot{Q}_w - \dot{Q}_e - \frac{1}{3} \dot{Q}$

此版本簡易二層法數學模式於質量守恆部分與前版相同，能量守恆部分係以  $\frac{1}{3} \dot{Q}$  作為熱輻射損失之計算，重新判斷煙層溫度及高度。

- 第四版簡易二層法(Version 4, 本研究):

此版本簡易二層法係為本篇論文之研究內容，本研究改良前版本之熱輻射模型，係依據 Siegel R. and Howell J.[25]於 1983 年所著書中，其推導一封閉面積內均值氣體計算各表面吸收、釋放之熱輻射模型，並將此封閉模型應用於本簡易二層法模型中。

此版簡易二層法(Version 4, 本研究)之數學模式:

$$\text{質量守恆: } \frac{d}{dt}(\rho_s V_s) = \dot{m}_s - \dot{m}_e$$

$$\text{能量守恆: } \frac{d}{dt} \left[ C_p \rho_s V_s (T - T_0) \right] = \dot{Q} - \dot{Q}_w - \dot{Q}_e - \dot{Q}_g$$

此版本簡易二層法數學模式於質量守恆部分與前版相同，能量守恆之熱輻射損失項與第三版計算方式不同，此版本與第三版之熱輻射項差異性如下表 4.2 所示，第三版係用  $\frac{2}{3}\dot{Q}$  作為熱輻射損失之計算，此版本則係以 Siegel R. and Howell J. 热輻射模型作為依據考慮居室內空間配置(view factor)及相關煙層放射率與透射率等性質應用至本簡易二層法之中，他們分別如 4.1、圖 4.2 及公式(4.1)所示。圖 4.2 中紅色實線區域為居室內上煙層所涵蓋之牆壁面積( $A_u$ )，藍色區域為居室內未被煙層所涵蓋之牆壁面積( $A_l$ )，居室內假設火源為輻射黑體並向四週散發熱輻射，一部分被牆壁吸收一部分，一部分穿透煙層被牆壁吸收，其餘部分則被煙層所吸收，如圖 4.3 所示。將原本火源輻射熱扣掉散失於居室牆壁之熱輻射量，即可計算出煙層中熱輻射損量  $\dot{Q}_g$ 。

$$\dot{Q}_g = \dot{Q}_F - (A_u \dot{q}_u + A_l \dot{q}_l)$$

表 4.2 第三版與第四版簡易二層法之比較

	Version 3(102年)	Version 4(本研究)
熱輻射模型	<ol style="list-style-type: none"> <li>將原火源的功率乘以1/3(Ref: CFAST V.6)作為熱輻射損失之考量。</li> <li>煙層與其他物體(如:牆壁)的熱輻射未被考慮。</li> <li>火源的熱對流未被考量進模擬中。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>使用下列公式計算出煙層的真實熱輻射功率(可為吸熱或放熱)</li> <li>考慮因素:空間配置(view factor)、煙層之放射率與透射率、火源功率、牆壁溫度。</li> <li>火源的熱對流未被忽略。</li> </ol>

$$\sum_{j=1}^N \left( \frac{\delta_{kj}}{\varepsilon_j} - F_{kj} \frac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j} \bar{\tau}_{kj} \right) q_j = \sum_{j=1}^N \left[ (\delta_{kj} - F_{kj} \bar{\tau}_{kj}) \sigma T_j^4 - F_{kj} \bar{\alpha}_{kj} \sigma T_g^4 \right] \quad (4.1)$$

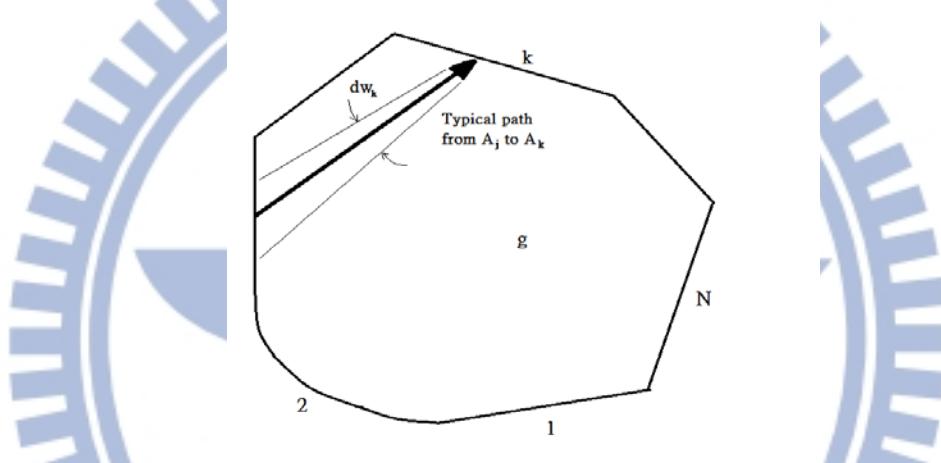


圖 4.1 Siegel and Howell 選用之封閉模型示意圖

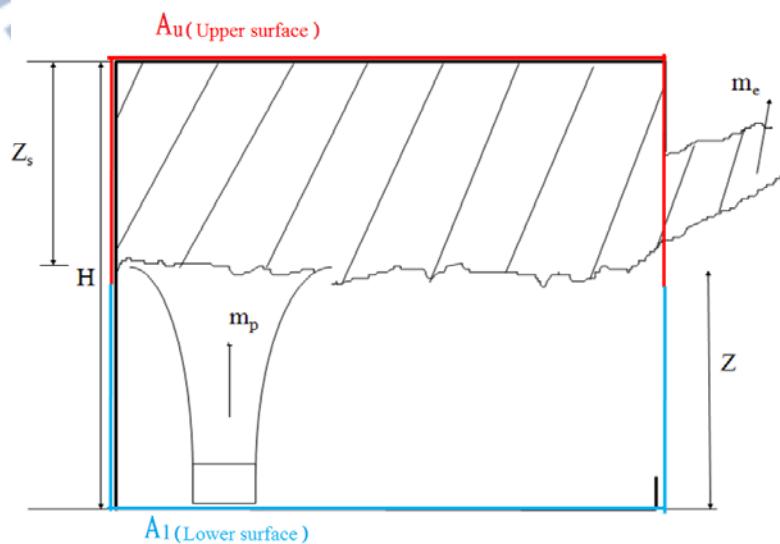


圖 4.2 本簡易二層法之封閉模型示意圖

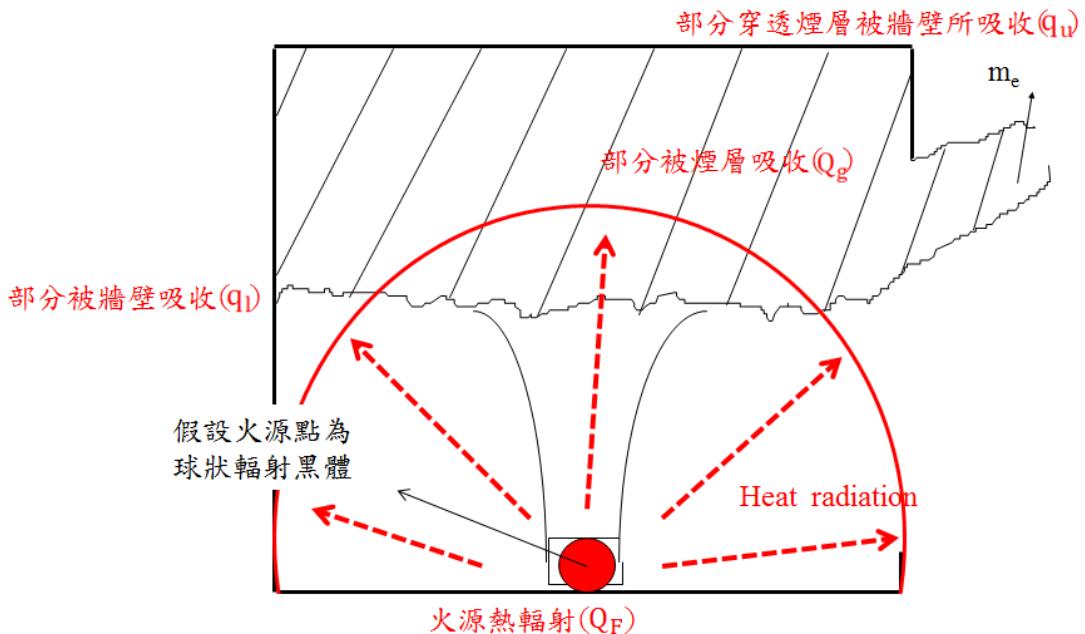


圖 4.3 本簡易二層法輻射封閉模型示意圖

#### 4.4 本研究與日本 BRI2002 驗證比對

本節將所撰寫之簡易二層法與相關文獻及日本 BRI2002 進行驗證比較。其目的為透過相同之邊界條件計算，探討簡易二層法在趨近相關二層法文獻及日本 BRI2002 之結果，以達到簡易二層法耗時短、且精確之優點。

##### 4.4.1 相關文獻

Ryohei et al [27] 研究二層法(Zone Model)在設定以固定煙層密度及煙層隨溫度變化之煙層密度下探討其煙層下降之趨勢，此篇文獻並以固定火源之邊界條件與 BRI2002 作比對，本研究將引用此文獻及其比對 BRI2002 之結果，以驗證本簡易二層法與文獻及日本 BRI2002 預測煙層下降之準確性。

#### 4.4.2. 邊界條件設定

本程式與日本 BRI2002 之邊界條件設定如表 4.3：

表 4.3 本程式與日本 BRI2002 之邊界條件設定

居室樓地板 面積( $m^2$ )	天花板 高度(m)	可燃物發熱 (kW)	裝修材料	排煙能力 ( $m^3/min$ )
100	2.4	0.2	無	無
計算時間間 隔(sec)	火災成長 係數	實驗係數 ( $kg/s/kW^{1/3}/m^{5/3}$ )	起始溫度 (K)	牆壁熱傳導 k(W/m/K)
0.01	0.2	0.076	303	$2.19 \times 10^{-4}$
牆壁密度 ( $kg/m^3$ )	牆壁比熱 ( $kJ/kg/K$ )	空氣比熱 ( $kJ/kg/K$ )		
860	0.993	1.0		

#### 4.4.3 模擬流程

本模擬程式運用此情境與日本 BRI2002(如表 4.3)模擬驗證。日本 BRI2002 採用 Zone Model 對火災居室的各種開口配置進行電腦模擬來預測煙沉降行為。本模擬考量相同居室尺寸、材料性質(比熱、熱傳導係數)與固定火源強度之相關邊界條件設定。

此步驟所發展出性能要求為判定及驗證程式設計之準確性與否的關鍵，針對前面定出之設計目標，更進一步量化來表現，因此本模擬要求除了達到準確外亦要為探討達到生命安全基準判定之嚴謹程度。

#### 4.4.4 模擬結果

如圖 4.4 所示為於居室面積  $100m^2$ 、高度 2.4 公尺之封閉居室內其火源釋放率設定為  $0.2 \text{ kW}$  定值下，此二層法文獻(日本 BRI20002)及本程式之煙層下降之結果。

如圖 4.4 所示，正方形空心趨勢線及三角形空心趨勢線分別為此文獻之二層法將煙層密度設定為定值  $0.7\text{kg/m}^3$  與  $1.0\text{kg/m}^3$  時其煙層下降隨時間變化之曲線；黑色圓圈實心趨勢線為此文獻之二層法將煙層密度視為理想氣體時，其密度隨煙層溫度改變之煙層下降之曲線；紅色實線及黑色實線係為本程式之簡易二層法與日本 BRI2002 將煙層密度視為理想氣體時，其密度隨煙層溫度變化之煙層下降之曲線。

由圖 4.4 結果顯示，同樣考慮煙層密度隨溫度變化之三條曲線（本程式簡易二層法、此文獻黑色圓圈趨勢線、日本 BRI2002 黑色實線），本程式煙層高度與此文獻之黑色圓圈實心趨勢線幾乎重疊，可見本簡易二層法與同樣使用二層法之文獻計算結果相近。本程式煙層高度從 2.4 公尺下降至 1.5 公尺共耗時 58 秒，而日本 BRI2002 煙層高度從 2.4 公尺下降至 1.5 公尺共耗時 62 秒，可見本程式煙層下降速度計算結果略快於日本 BRI2002，由其二結果並可驗證本程式簡易二層法之準確性。

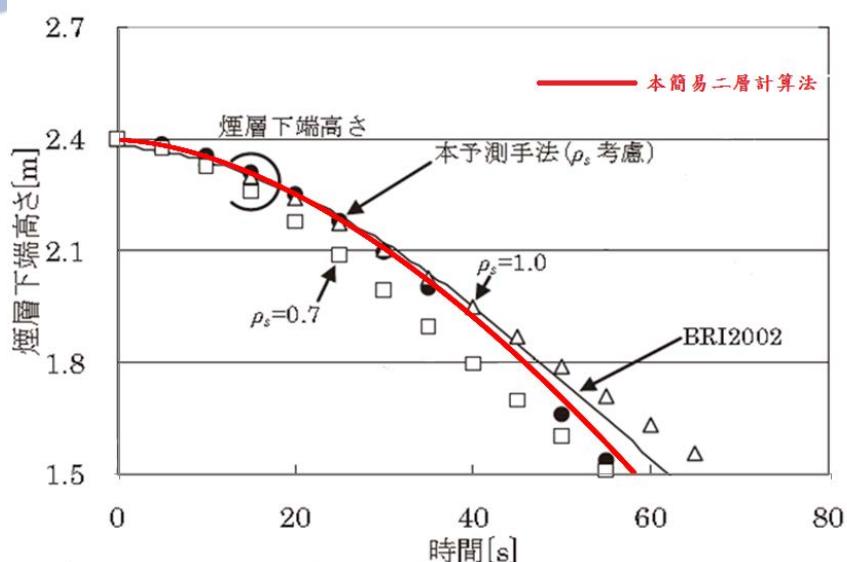


圖 4.4 日本 BRI2002 與本程式煙層高度與時間關係圖

## 4.5 各版本簡易二層法與 FDS 有無熱輻射模型之比較

本節將運用火場分析軟體 FDS 與本研究室所研發之簡易二層法各版本進行有無熱輻射模型之煙層溫度及煙層高度之比較，並探討其煙層下降結果與目前「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」之差異性，其相關邊界條件設定如下表 4.4。

為使煙層溫度比較之一致性，本模擬軟體 FDS 煙層溫度計算方式係用 N-Percent Method 計算出各時間點當下之煙層高度，再將此煙層高度上方之各溫度量測點平均，此步驟乃比對簡易二層法將上方煙層視為均值假設作同步之修正，其中由國內外期刊與論文顯示 N 值取 10 至 20 係為較保守之設計，本篇研究之 N 值計算均取 10( $C_n=0.1$ )。

表 4.4 各簡易二層法版本比較之相關邊界條件設定

居室樓地板面積( $m^2$ )	平均天花板高度 (m)	可燃物發熱量 ( $MJ/m^2$ )	裝修材料	自然排煙口上緣離樓地板距離 (m)
26.09	2.7	0.1	耐燃一級	2.4
排煙口大小 ( $m^2 \times m^2$ )	計算時間間隔(sec)	實驗係數 ( $kg/s/kW^{1/3}/m^{5/3}$ )	起始溫度 (K)	牆壁熱傳導 $k(W/m/K)$
1.42m×1.42m	0.01	0.076	303	0.15
牆壁密度 ( $kg/m^3$ )	牆壁比熱 ( $kJ/kg/K$ )	空氣比熱 ( $kJ/kg/K$ )		
850	1.6	1.0		

#### 4.5.1 模擬結果

如圖 4.5 所示，三條實線即為本研究室各版本簡易二層法之煙層溫度計算結果，兩條虛線為 FDS 考量 N-Percent Method,  $C_n=0.1$  於有無熱輻射模型之計算結果。

如圖 4.4 所示，各實虛線於 250 秒煙層溫度計算溫度結果分別如下，第四版簡易二層法(Version 4)紫色實線為 348.6 度；第三版簡易二層法(Version 3)草綠色實線為 331.2 度；第二版簡易二層法(Version 2)紅色實線為 413 度；FDS 考慮熱輻射模式為 352.8 度；FDS 無考慮熱輻射模式為 397.2 度。

在增列熱輻射損失情況下，第三版與第四版簡易二層法與 FDS 計算結果皆有溫度下降之趨勢，其中以本研究之第四版簡易二層法與考量熱輻射之 FDS 煙層溫度結果較為趨近，其原因係因本研究之第四版簡易二層法熱輻射模型係依據 Siegel and Howell 選用之封閉模型作實際居室內部空間配置(view factor)以及放射率及透射率之計算，較符實際狀況，而第三版簡易二層法則是以火源熱功率乘以 1/3 作為熱輻射損失估算，由此結果可知，本研究第四版簡易二層法於煙層溫度判定與 FDS 較為接近，其準確性高於第三版簡易二層法。

如圖 4.6 所示，三條實線即為本研究室各版本簡易二層法之煙層高度計算結果，三條虛線及為 FDS 考量 N-Percent Method,  $C_n=0.1$  於有無熱輻射模型及  $C_n=0.6$  有熱輻射模型之計算結果，紅色虛線係為 1.8m 煙層高度線。

如圖 4.6 所示，各實虛線到達煙層高度 1.8m 計算時間結果分別如下，第四版簡易二層法(Version 4)紫色實線為 83.2 秒；第三版簡易二層法(Version 3)草綠色實線為 75.4 秒；第二版簡易二層法(Version 2)紅色實線為 73.2 秒；FDS 考慮熱輻射模式( $C_n=0.1$ )為 153.2 秒；FDS 無考慮熱輻射模式( $C_n=0.1$ )為 165.3 秒；FDS 考慮熱輻射模式( $C_n=0.6$ )則於 250 秒內其煙層高度均未到達 1.8 公尺；「建築物防火避難安全性能驗

證技術手冊」煙層下降至 1.8m 則為 16 秒。

如圖 4.6 所示，簡易二層法於煙層高度趨勢皆呈拋物線狀，而 FDS 在火災初期煙層高度呈現滯留狀態一段時間後才開始下降，其係因本簡易二層法於火災發生當下即直接計算煙層厚度進而推算馬上得到煙層高度，而 FDS 則考量火源產生之煙柱流(Plume)上升及在天花板產生噴流(Ceiling Jet)蓄積之時間。另外，N-Percent Method 亦影響 FDS 煙層下降時間之計算，由圖 4.10 所示，取  $C_n=0.6$  之煙層下降速度明顯慢於  $C_n=0.1$  之設定，可知 N 值取愈小對煙控設計較為安全，由國內外期刊與論文顯示 N 值取 10 至 20 級為較保守估之設計，本篇研究之 N 值計算均取 10( $C_n=0.1$ )。

由此圖 4.6 可明顯得知，使用「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」判斷煙層下降過於嚴苛不符實際狀況，其係因「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」之火源發熱量與其煙層密度於火災發生當下係用定值直接作煙層下降之計算，而本簡易二層法係之火源發熱量採  $T^2$  火災成長模式且密度根據理想氣體方程式隨溫度而變化，由結果與 FDS 比對後可知本簡易二層驗證技術係為較合理之驗證方式。

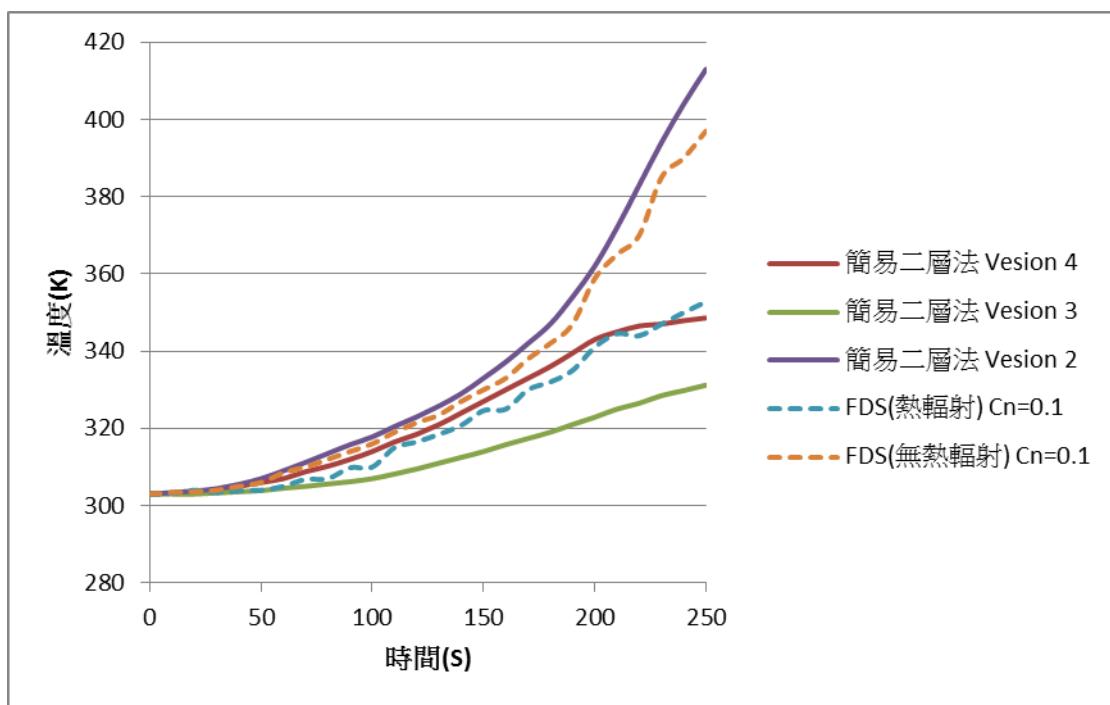


圖 4.5 各簡易二層法與 FDS 煙層溫度隨時間變化圖

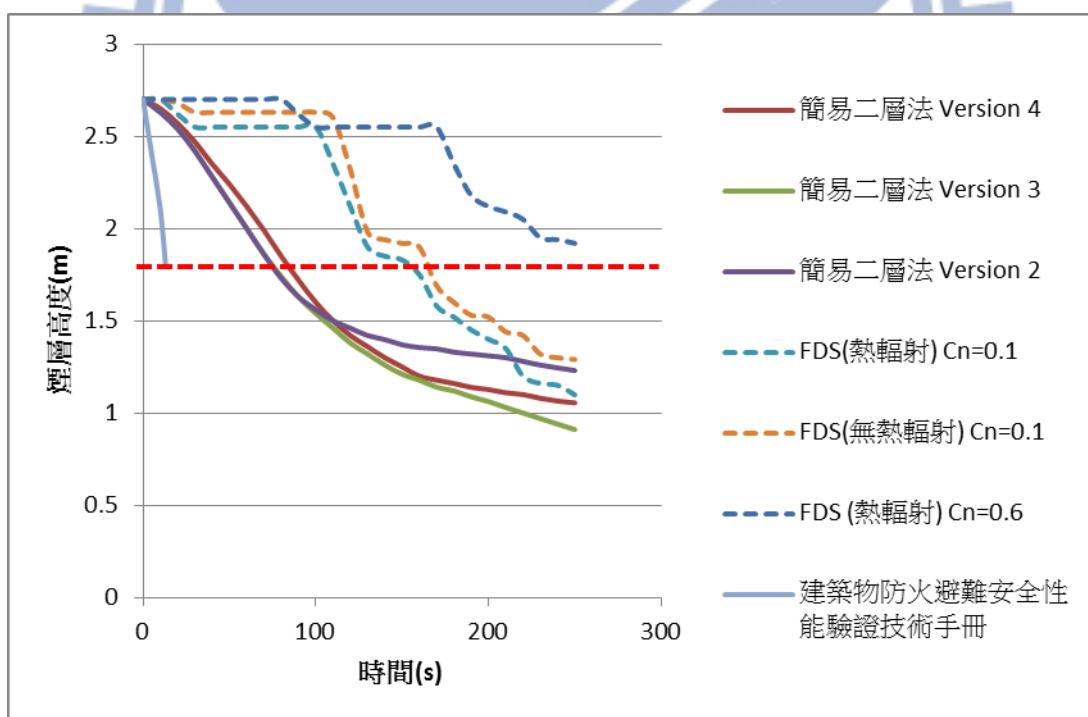


圖 4.6 各簡易二層法、FDS 與檢證法煙層高度隨時間變化圖

## 4.6 本簡易二層法與 Chung 實驗、FDS 模擬之比較

### 4.6.1 相關文獻

Chung et al[17]研究主要在探討防煙捲簾(smoke curtain)在多重隔間(multi- compartment)發生火災時之功效外，防煙區劃對避難逃生行為之探討，該篇研究亦針對多重隔間不同情境下之熱釋放率、煙層下降程度進行探討，且實驗樣本多，本研究將與此實驗比較，其實驗配置圖如圖 4.7 所示，各邊界條件如表 4.5 所示。

### 4.6.2. 邊界條件設定

表 4.5 本程式與 FDS 及 Chung et al[17]實驗之邊界條件設定

居室樓地板面積( $m^2$ )	天花板高度(m)	可燃物發熱( $MJ/m^2$ )	裝修材料	排煙能力( $m^3/min$ )
26.09	2.7	0.1	耐燃一級	無
計算時間間隔(sec)	火災成長係數	實驗係數( $kg/s/kW^{1/3}/m^{5/3}$ )	起始溫度(K)	牆壁熱傳導k(W/m/K)
0.01	0.00189	0.076	303	0.15
牆壁密度( $kg/m^3$ )	牆壁比熱(kJ/kg/K)	空氣比熱(kJ/kg/K)		
850	1.6	1.0		

### 4.6.3 模擬流程

本模擬程式分別與 Chung et al[17]實驗(如表 4.5)及以此實驗相同邊界條件設置之 FDS 模擬進行驗證。為使煙層溫度比較之一致性，本模擬軟體 FDS 及實驗文獻之煙層溫度計算方式係用 N-Percent Method 計算出各時間點當下之煙層高度，再將此煙層高度上方之各溫度量測點平均，此步驟乃比對簡易二層法將上方煙層視為均值假設作同步之修正。

#### 4.6.4 模擬結果

此實驗居室空間長 3.3 公尺、寬 7.9 公尺、高 2.7 公尺，頂端為完全封閉，火源最大熱釋放率為 100kW，火源面積大小  $1 \times 1 \text{ m}^2$ ，其實驗與 FDS 測點 T0 與測點 T1 位置如圖 4.7、圖 4.8 所示。

實驗熱釋放率與時間關係圖如圖 4.9 所示；FDS 熱釋放率與時間關係如圖 4.10 所示；居室內煙層溫度與時間關係圖如圖 4.11；居室內煙層高度與時間關係圖如圖 4.12 所示。

本簡易二層法於煙層溫度趨勢與本篇實驗、FDS 結果相近，且溫度趨勢介於兩實驗測點 T0 與 T1 之間，FDS 溫度呈現鋸齒狀係因補氣口之影響造成其跳動。

本簡易二層法煙層高度從 2.7 公尺下降至 1.8 公尺共耗時 74 秒，下降至 1 公尺共耗時 192.6 秒；FDS 煙層從 2.7 公尺下降至 1.8 公尺共耗時 110 秒，下降至 1 公尺共耗時 220 秒；實驗測點 T0 從煙層 2.7 公尺下降至 1.8 公尺共耗時 120 秒，下降至 1 公尺共耗時 141 秒；實驗測點 T1 從煙層 2.7 公尺下降至 1.8 公尺共耗時 115 秒，下降至 1 公尺共耗時 173 秒。

本簡易二層法於煙層高度趨勢呈拋物線狀，而實驗量測點及 FDS 在火災初期煙層高度呈現滯留狀態一段時間後才開始下降，其係因本簡易二層法於火災發生當下即直接計算煙層厚度進而推算馬上得到煙層高度，而實驗量測點及 FDS 則考量火源產生之煙柱流(Plume)上升及在天花板產生噴流(Ceiling Jet)蓄積之時間，其中 T0 量測點下降較快係因其量測點位置離火源點較近。

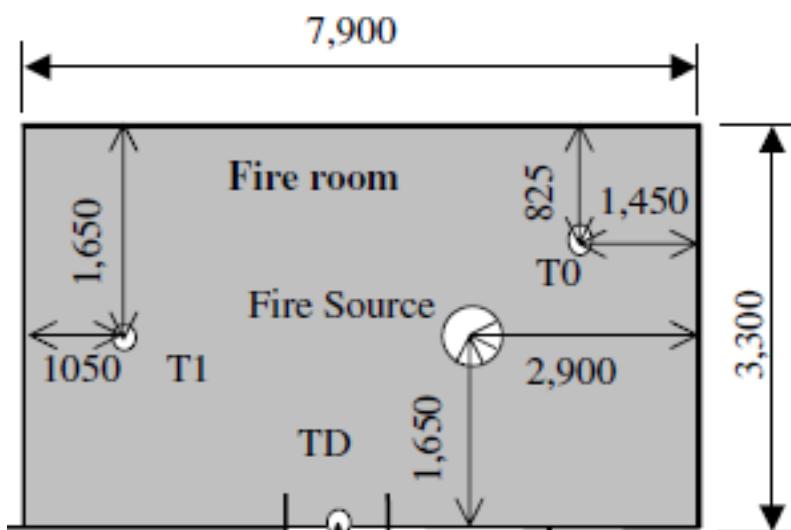


圖 4.7 Chung et al[17] 實驗配置圖

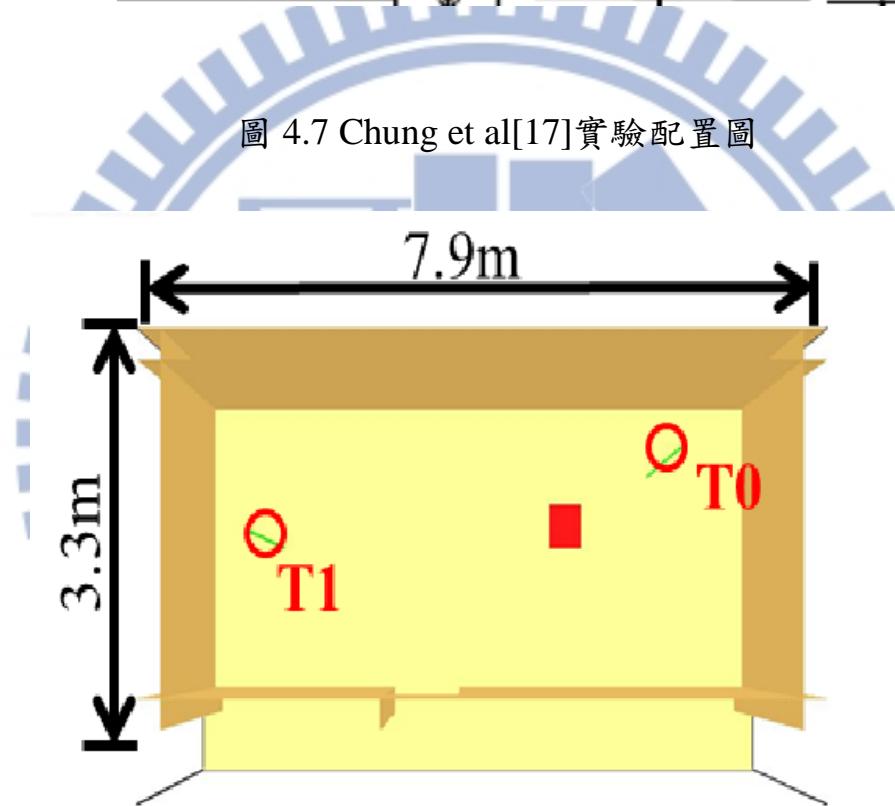


圖 4.8 依據 Chung et al[17] 實驗之 FDS 模擬配置圖

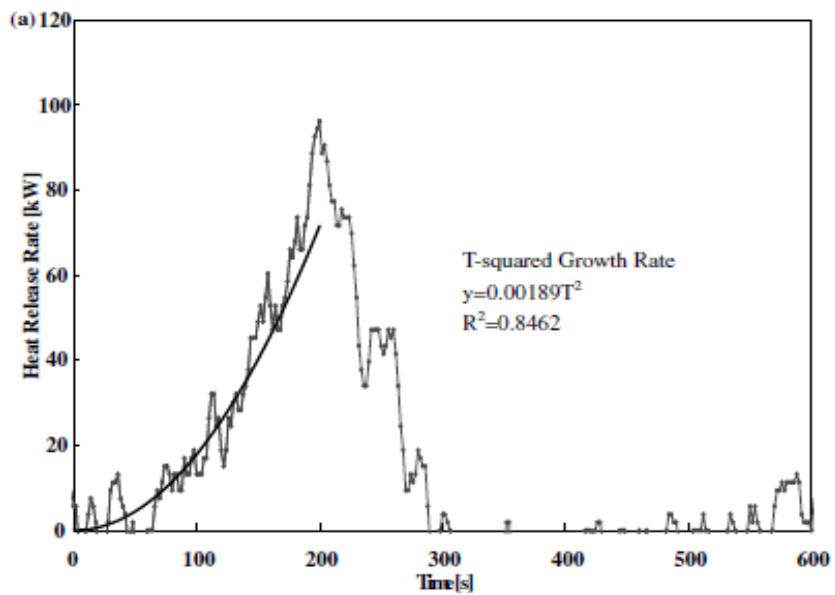


圖 4.9 實驗熱釋放率與時間關係圖

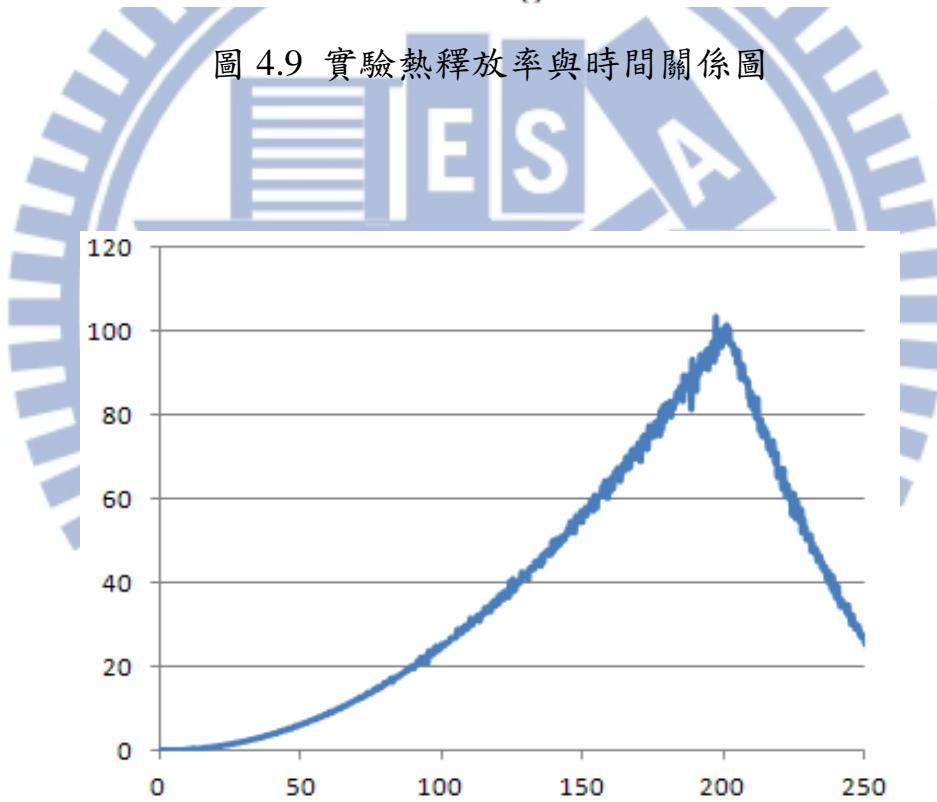


圖 4.10 依據 Chung et al[17]實驗之 FDS 热釋放率與時間關係圖

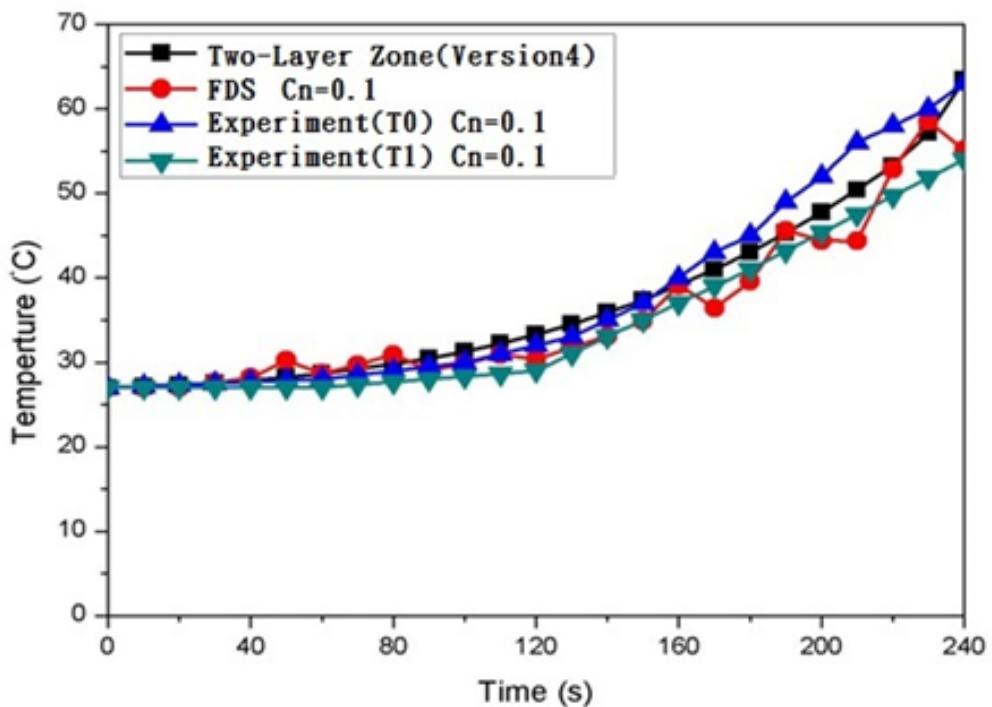


圖 4.11 與實驗比對之煙層溫度與時間關係圖

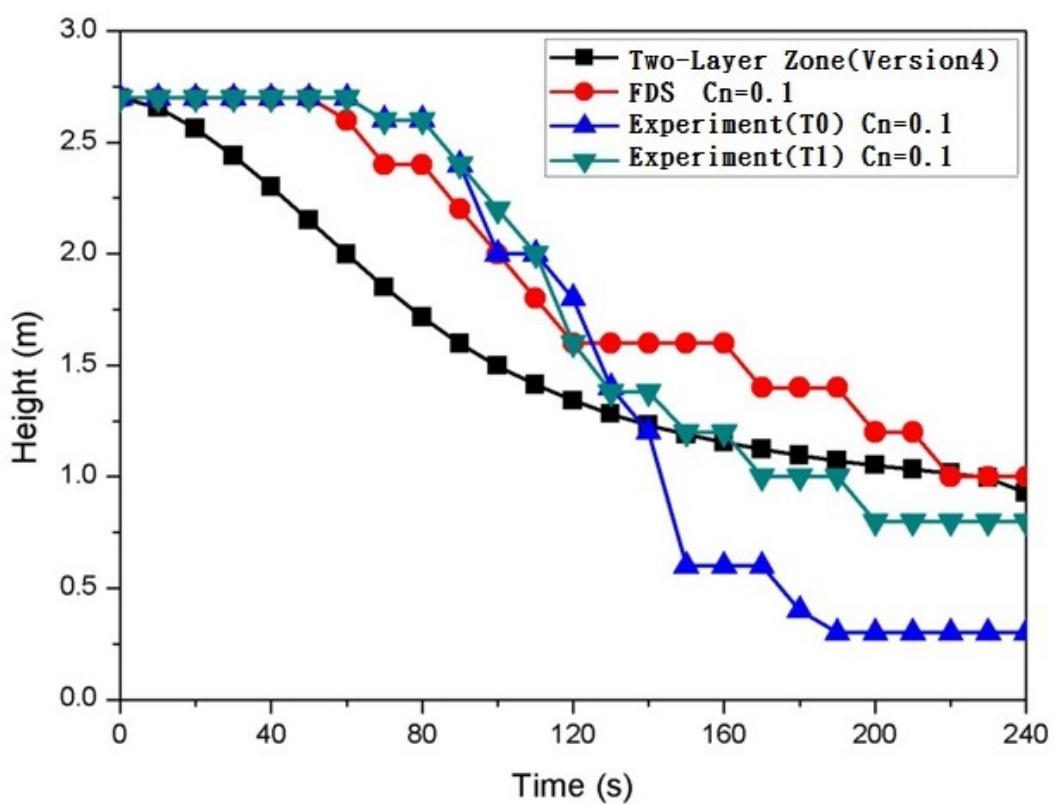


圖 4.12 與實驗比對之煙層高度與時間關係圖

## 4.7 本簡易二層法與檢證法於 $100m^2$ 至 $300m^2$ 之比較

本節將以三種樓地板面積( $100m^2$ 、 $200m^2$ 、 $300m^2$ )之居室對本簡易二層法機械排煙及自然排煙功能與目前「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」之計算結果作煙層下降趨勢比較並與避難時間作對照，本比較之目的為探討本簡易二層法與「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」之樓地板面積適用邊界範圍。

### 4.7.1. 邊界條件設定

表 4.6 本簡易二層法與檢證法相關邊界條件設定

居室樓地板面積( $m^2$ )	天花板高度(m)	可燃物發熱(MJ/m $^2$ )	自然排煙口大小( $m^2$ )	機械排煙(CMM)
100、200、300	2.6	0.1	2、4、6	100、200、300
計算時間間隔(sec)	火災成長係數	實驗係數(kg/s/kW $^{1/3}$ /m $^{5/3}$ )	起始溫度(K)	牆壁熱傳導k(W/m/K)
0.01	0.00189	0.076	303	0.15
牆壁密度(kg/m $^3$ )	牆壁比熱(kJ/kg/K)	空氣比熱(kJ/kg/K)	裝修材料	
850	1.6	1.0	耐燃一級	

### 4.7.2 模擬結果

如圖 4.13 所示，居室面積為  $100m^2$ ，紅色實線為本簡易二層法自然排煙結果，其煙層下降至 1.8m 所需時間為 59.84 秒；草綠色實線為簡易二層法機械排煙結果，其於 35.54 秒已達收斂標準煙層高度停滯於 2.3m，其驗證過程中未達煙層高度 1.8 公尺；紫色實線為目前「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」煙層下降時間計算結果，其煙層下降至 1.8m 所需時間為 45.8 秒；其居室避難時間為 59.84 秒。

如圖 4.14 所示，居室面積為  $200m^2$ ，紅色實線為本簡易二層

法自然排煙結果，其煙層下降至 1.8m 所需時間為 77.47 秒；草綠色實線為簡易二層法機械排煙結果，其於 58.66 秒已達收斂標準煙層高度停滯於 2.23m，其驗證過程中未達煙層高度 1.8 公尺；紫色實線為目前「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」煙層下降時間計算結果，其煙層下降至 1.8m 所需時間為 67.25 秒；其居室避難時間為 66.6 秒。

如圖 4-15 所示，居室面積為  $300m^2$ ，紅色實線為本簡易二層法自然排煙結果，其煙層下降至 1.8m 所需時間為 97.27 秒；草綠色實線為簡易二層法機械排煙結果，其於 80.06 秒已達收斂標準煙層高度停滯於 2.17m，其驗證過程中未達煙層高度 1.8 公尺；紫色實線為目前「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」煙層下降時間計算，其煙層下降至 1.8m 所需時間為 85.41 秒；其居室避難時間為 76.42 秒。

由圖 4-13、圖 4-14 所示，目前「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」於  $200m^2$  計算居室煙層下降時間為 67.25 秒，居室避難時間為 66.6 秒，其煙層下降至 1.8m 時間大於避難時間 1.35 秒；於  $100m^2$  計算居室煙層下降時間為 45.8 秒，居室計算避難時間為 59.84 秒，其避難時間大於煙層下降至 1.8m 時間 14.04 秒。由此結果顯示可知，於居室  $200m^2$  以下目前「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」之煙層下降驗證方法係過於嚴苛不堪適用，而本簡易二層法  $200m^2$  下係大於其所計算避難時間，相對於目前「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」，本簡易二層法為較佳之驗證方式。

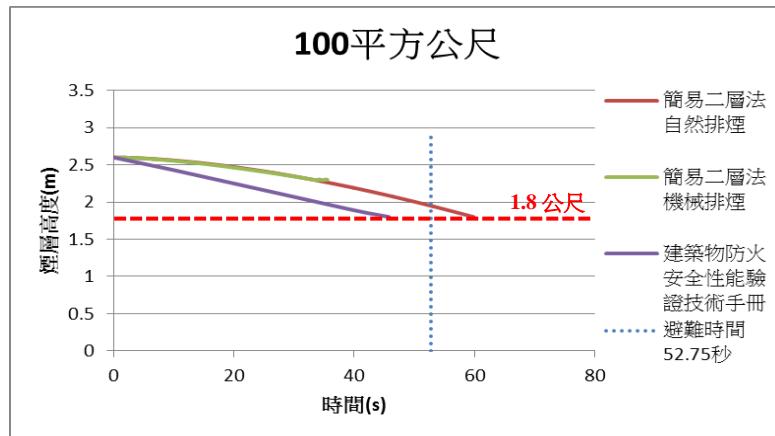


圖 4.13 樓地板面積  $100m^2$  煙層高度與時間關係圖

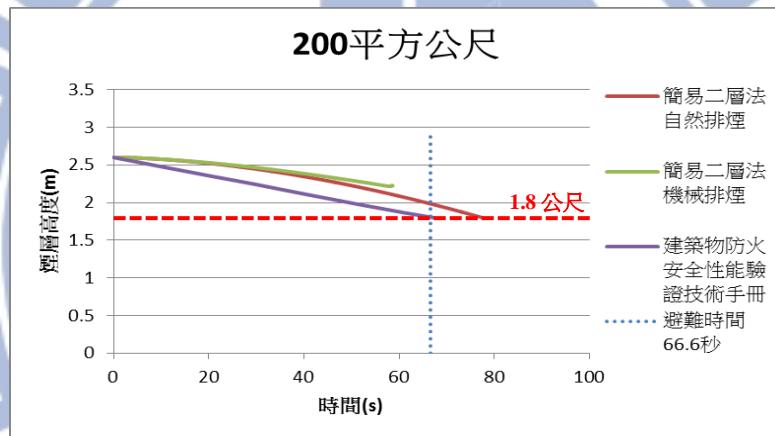


圖 4.14 樓地板面積  $200m^2$  煙層高度與時間關係圖

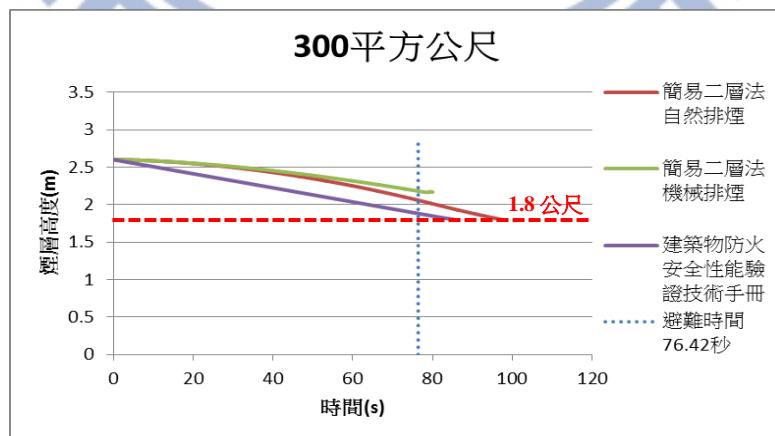


圖 4.15 樓地板面積  $300m^2$  煙層高度與時間關係圖

## 4.8 夾層情境計算結果

本節將所設計四種火源位置於夾層之簡易二層法中，計算其煙層及溫度變化，並與火場分析軟體 FDS 進行比較，參考國內法規「建築技術規則建築設計施工篇」中其對夾層面積、防煙垂壁高度、排煙口作設計之依據，本情境分析目的為探討此計算方法與模擬之情形有和不同之處並探究其原因。

### 4.8.1 情境設定介紹

本研究設計四種夾層火源情境並與 FDS 比對分析探討，其夾層情境火源示意圖及 FDS 夾層情境設置示意圖如圖 4.16 及圖 4.17 所示。情境一之火源位置設於夾層下方；情境二之火源位置設於夾層上方；情境三之火源位置設於居室內無夾層之樓地板處；情境四係依據目前「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」對於夾層情境之煙層下降計算方式之比對，目前國內法規夾層情境計算方式係將夾層面積與該樓地板面積作總和並當作新樓地板面積設定計算。

本研究情境之夾層、排煙口及防煙垂壁依據國內法規「建築技術規則建築設計施工篇」之設置，說明如下：

- **夾層**: 夾於樓地板與天花板間之樓層；同一樓層內夾層面積之和，超過該層樓地板面積三分之一或一百平方公尺者，視為另一樓層。
- **防煙壁**: 係指以不燃材料建造之垂壁，自天花板下垂五十公分以上。
- **排煙口**: 開口面積不得小於防煙區劃部份樓地板面積百分之二，並應開設在天花板或天花板下八十公分範圍內之外牆

本研究情境之夾層設定為樓地板面積之三分之一，防煙垂壁設定為五十公分，排煙口面積設定為樓地板面積之百分之二。

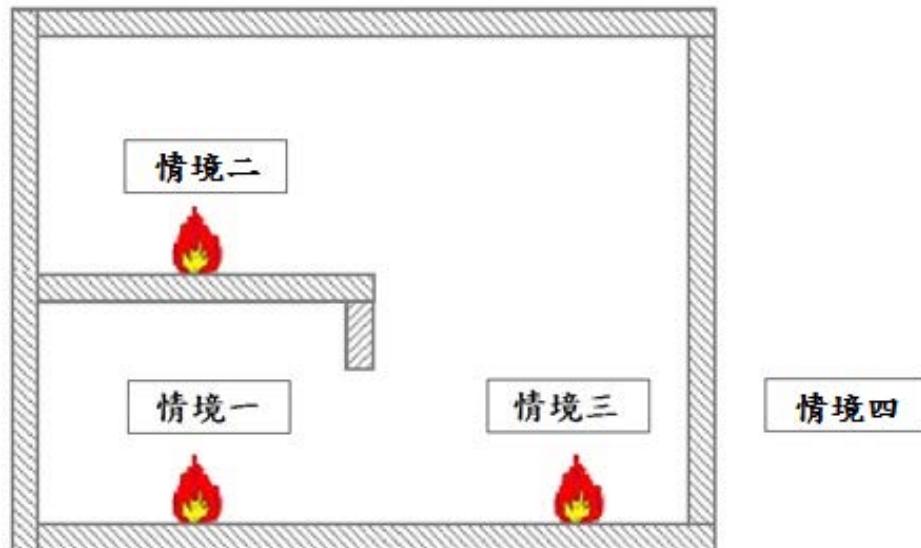


圖 4.16 夾層情境火源位置設計圖

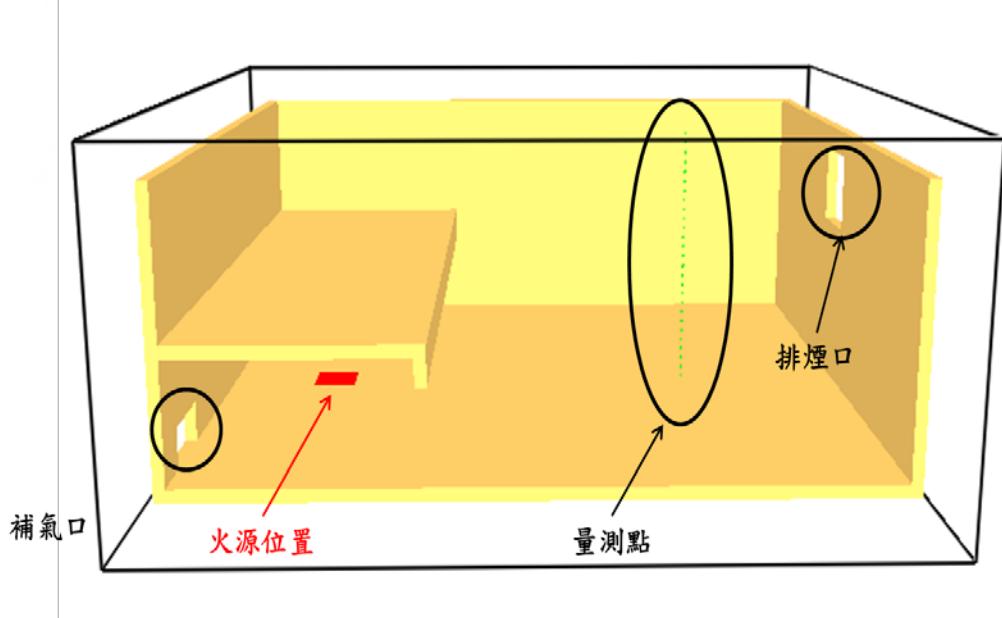


圖 4.17 FDS 夾層情境設置示意圖

#### 4.8.2. 邊界條件設定

表 4.7 夾層情境相關邊界條件設定

居室樓地板面積( $m^2$ )	平均天花板高度(m)	可燃物發熱量(MJ/ $m^2$ )	裝修材料	自然排煙口上緣離樓地板距離(m)
150	6	560	耐燃二級	5.5m
排煙口大小( $m \times m$ )	計算時間間隔(sec)	實驗係數( $kg/s/kW^{1/3}/m^{5/3}$ )	起始溫度(K)	牆壁熱傳導k(W/m/K)
1.74m $\times$ 1.74m	0.01	0.076	298	$0.4 \times 10^{-4}$
牆壁密度( $kg/m^3$ )	牆壁比熱(kJ/kg/K)	空氣比熱(kJ/kg/K)	垂壁高度(m)	夾層高度(m)
300	1.63	1.0	0.5	3

#### 4.8.3 情境一模擬結果

如圖 4.18、圖 4.19 所示，本簡易二層法煙層下降至 1.8m 時間為 139.4 秒;FDS 煙層下降至 1.8m 時間為 152.6 秒，本簡易二層法煙層溫度為 135.9 度;FDS 煙層溫度為 143.6 度。

由圖 4.18 結果顯示，本簡易二層法於火災初期煙層高度停滯時間為 28.33 秒，其因情境一之火源位置位於夾層下方且設有防煙垂壁，28.33 秒為本簡易二層法計算防煙垂壁內所圍空間之續煙時間;而 FDS 於火災初期煙層高度停滯時間為 51.75 秒，比本簡易二層法慢了 23.42 秒，其係因 FDS 除了考量煙層蓄積於垂壁所圍空間之時間，也需考量到煙柱流(Plume)上升及天花板噴流(Ceiling Jet)時間之計算。

如圖 4.19 所示，本情境之煙層溫度上升趨勢與 FDS 相近。

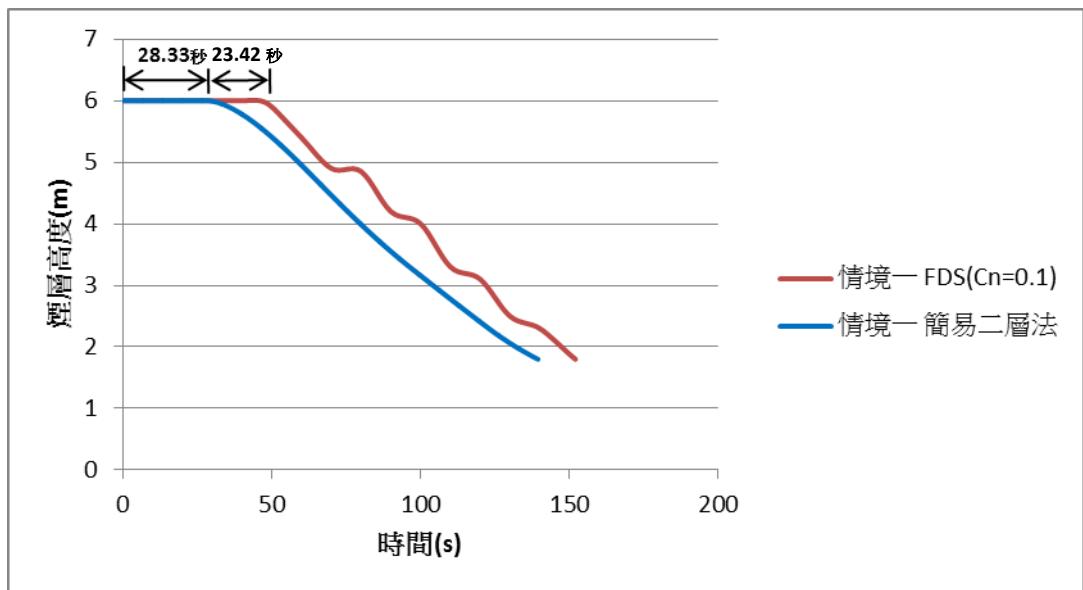


圖 4.18 情境一煙層高度與時間關係圖

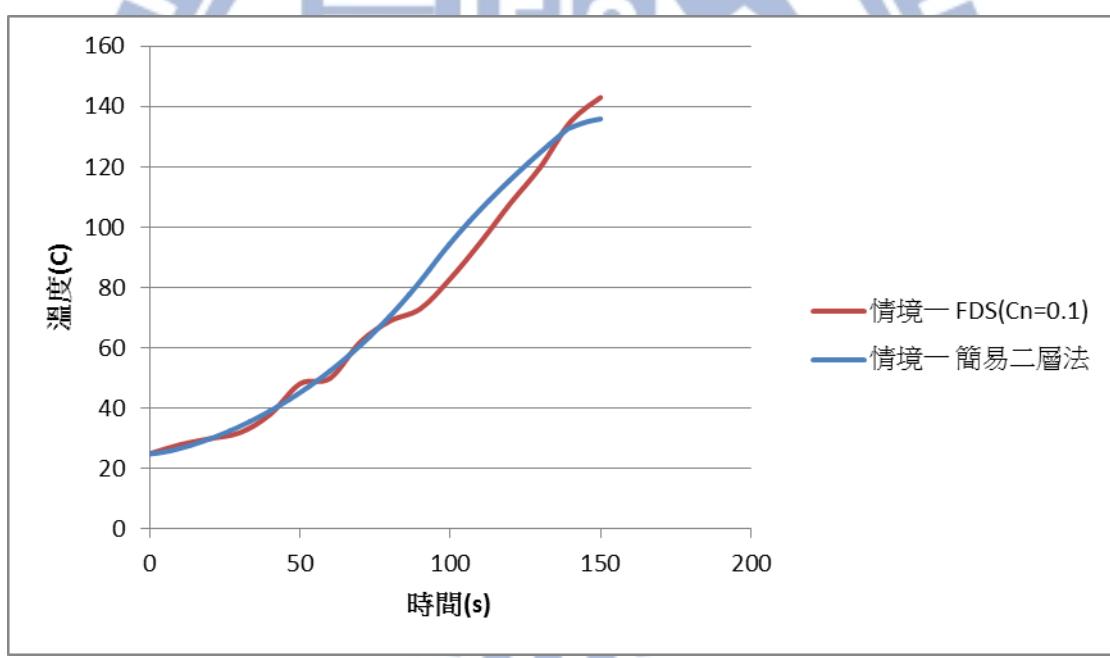


圖 4.19 情境一煙層溫度與時間關係圖

#### 4.8.4 情境二模擬結果

如圖 4.20、圖 4.21 所示，本簡易二層法與 FDS 煙層高度均未達 1.8m，本簡易二層法於 183.3 秒已達程式收斂標準煙層高度位於 4.06m，FDS 到達本簡易二層法之收斂煙層高度時間為 254.6 秒。本簡易二層法煙層溫度為 108.7 度；FDS 煸層溫度為 105.6 度。

如圖 4.20 所示，本簡易二層法於火災初期即直接計算煙層厚度，故整體趨勢呈拋物線狀，FDS 停滯原因係因煙柱流(Plume)及天花板噴流(Ceiling Jet)之延遲時間，本簡易二層法與 FDS 因自然排煙口因素皆在 120 秒左右後開始呈現煙層下降速度減慢之趨勢，其係因此居室煙生成率與排煙口排煙率漸漸相近，使得煙層下降速度趨緩最後在 4m 左右達程式所設定之收斂標準。如圖 4.21 所示，本情境之煙層溫度上升趨勢與 FDS 相近。



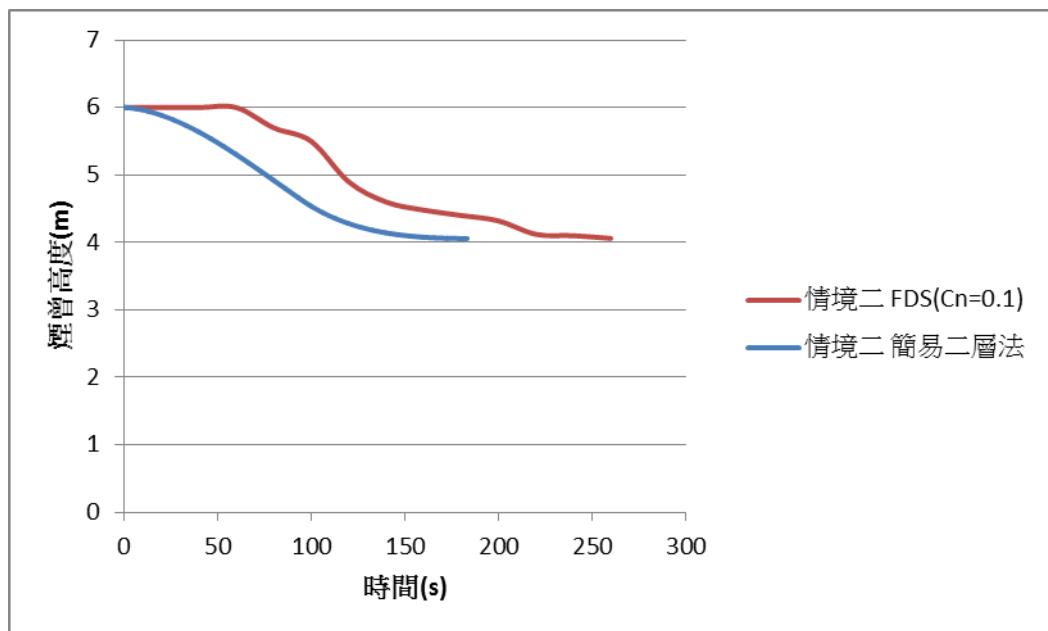


圖 4.20 情境二煙層高度與時間關係圖

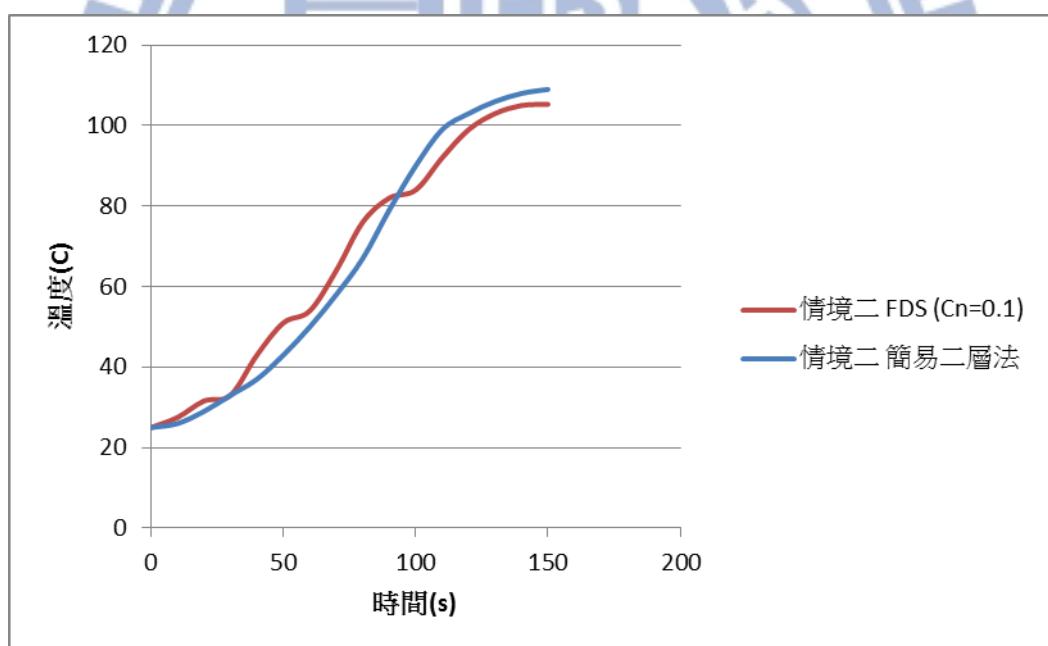


圖 4.21 情境二煙層溫度與時間關係圖

#### 4.8.5 情境三模擬結果

如圖 4.22、圖 4.23 所示，本簡易二層法煙層下降至 1.8m 時間為 127.29 秒;FDS 煙層下降至 1.8m 時間為 161.2 秒，本簡易二層法煙層溫度為 118.2 度;FDS 煙層溫度為 114.6 度。

如圖 4.22 所示，本簡易二層法於火災初期即直接計算煙層厚度，故整體趨勢成拋物線狀，FDS 停滯原因係因煙柱流(Plume)及天花板噴流(Ceiling Jet)之延遲時間，此情境之煙層下降計算方式並不需考慮有夾層狀況，其煙生成率採用舊版簡易二層法之設定，故情境三之煙層高度結果既為一般居室無夾層狀況之計算結果。如圖 4.23 所示，本情境之煙層溫度上升趨勢與 FDS 相近。



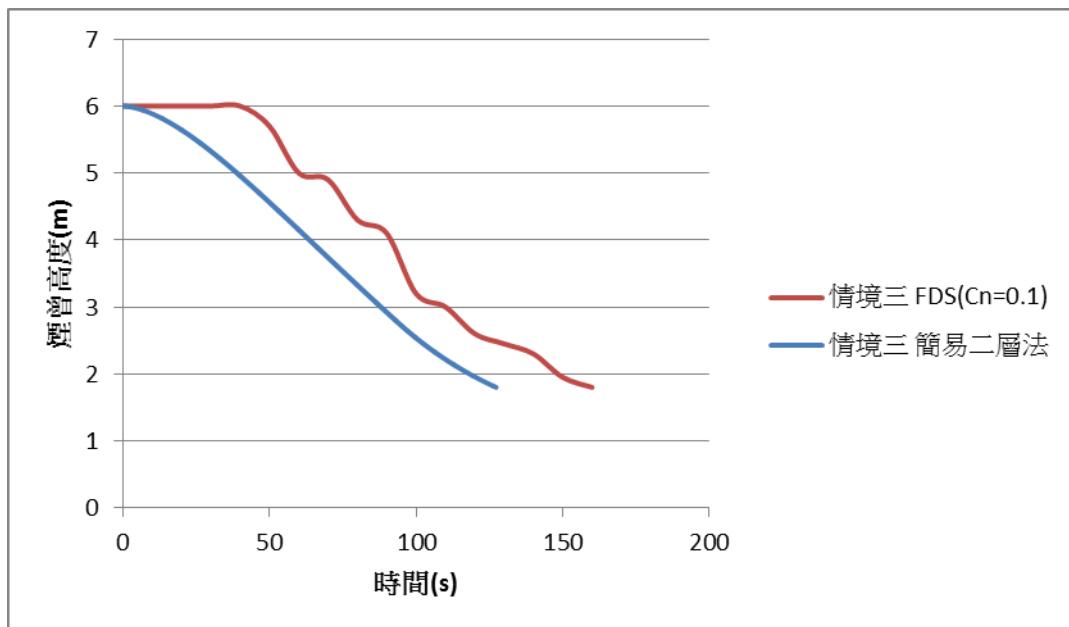


圖 4.22 情境三煙層高度與時間關係圖

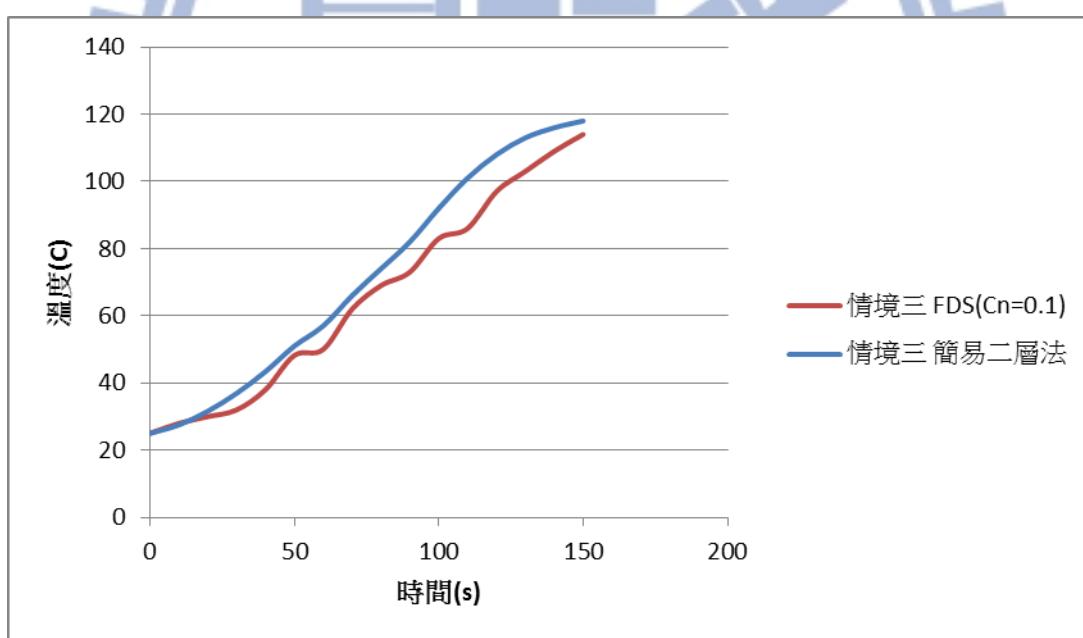


圖 4.23 情境三煙層溫度與時間關係圖

#### 4.8.6 情境四煙層高度模擬結果與各情境之比較

情境四之設計目的係由於目前夾層居室之煙層下降計算方法係將夾層面積併入樓地板面積作新的居室面積參數計算，為了探討此計算方式之安全性，故將本簡易二層法及FDS作相同計算方式之比較，並與目前夾層情境一(有無防煙垂壁)之煙層下降結果作對照探討其差別。

如圖 4.24 所示，此圖為情境四與各情境煙層高度下降之結果，五條實線為本簡易二層法各情境煙層下降之趨勢，紅色虛線為 1.8m 高度線；橘色虛線為 FDS 於情境四之計算結果；情境一(有防煙垂壁)簡易二層法煙層下降至 1.8m 時間為 139.41 秒；情境一(無防煙垂壁)簡易二層法煙層下降至 1.8m 時間為 111.08 秒；情境二簡易二層法煙層下降至 4.06m 已達程式收斂標準；情境三簡易二層法煙層下降至 1.8m 時間為 127.29 秒；情境四簡易二層法煙層下降至 1.8m 時間為 135.03 秒；情境四 FDS 煙層下降至 1.8m 時間為 171.13 秒。

由圖 4.24 結果可知，情境一(無防煙垂壁)之煙層下降速度最快(111.08 秒)，係因此情境於夾層邊界之煙生成率採用 Roger H.[20]所提出之露台型煙流(Balcony spill plume)公式，其多考量了煙流通過夾層邊緣所捲入之空氣造成煙生成率之增量。

由前述夾層樓地板面積計算說明可知，情境四之樓地板面積係將居室「夾層面積」+「原樓地板面積」作總和重新計算，本情境原樓地板面積設定為  $150\text{m}^2$ ，夾層面積則依據目前法規「建築技術規則建築設計施工篇」中所述夾層面積最大限制為原樓地板面積之  $1/3$  作設定即為  $50\text{m}^2$ ，故情境四樓地板面積則採  $150\text{m}^2 + 50\text{m}^2 = 200\text{m}^2$ ，而此樓地板之設定仍在簡易二層法適用範圍內( $\leq 200\text{m}^2$ )。

由圖 4.24 結果可知，簡易二層法情境四煙層下降至 1.8m 之時間較情境三與情境一(無防煙垂壁)晚，其係因情境四計算參數之樓地板面積為  $200\text{m}^2$ ，而其他情境(情境一、二、三)皆為  $150\text{m}^2$ ，故情境四

之計算方式因面積影響提供了煙流更多蓄積空間使其煙層下降速度較慢，其中情境一(有防煙垂壁)之煙層下降時間較情境四晚，係因情境一之防煙垂壁提供了夾層下方蓄煙空間，使得煙層在夾層下方停滯了 28.33 秒。

綜上結果可知，簡易二層法夾層各情境到達 1.8m 時間皆小於 FDS 到達 1.8m 時間，故可推斷本簡易二層法不管採用哪種夾層情境之煙層高度計算結果皆較 FDS 安全性高，而情境一之計算方式採用 Roger H.[20]所提出之露台型煙流(Balcony spill plume)公式，多考量了煙流通過夾層邊緣所捲入之空氣造成煙生成率之增量，且在無防煙垂壁下其煙層下降時間最快，故可建議將此夾層情境計算方式納入目前簡易二層法中，以提供居室夾層情境較安全且合理之煙層下降驗證。

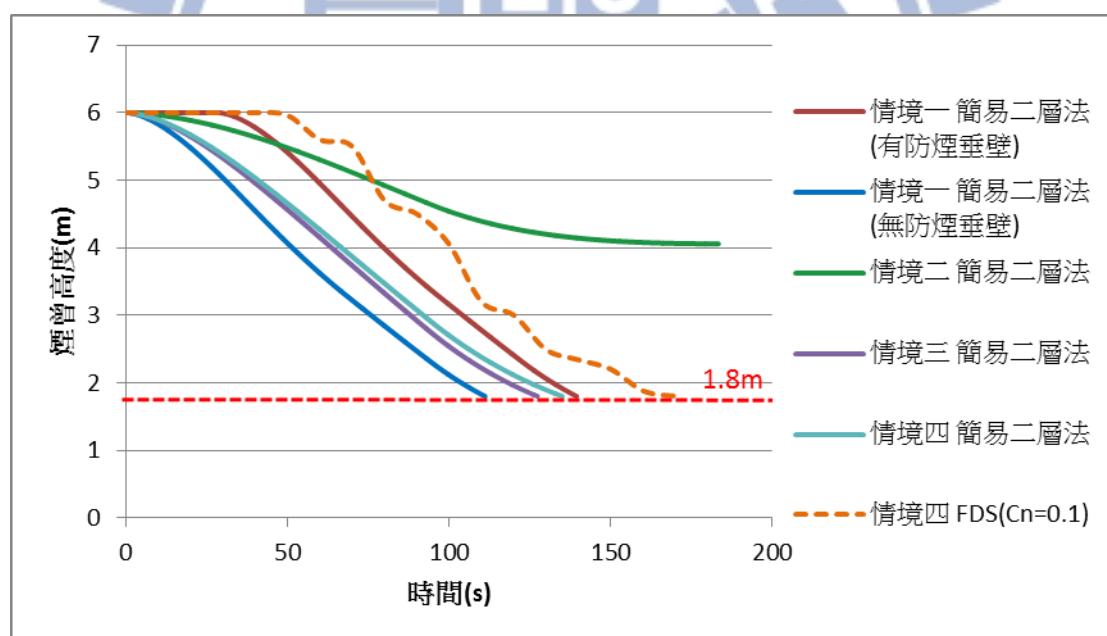


圖 4.24 各情境煙層高度與時間關係圖

## 4.9 結論

1. 本研究考量之簡易二層法驗證結果與日本 BRI2002 相近;在增列熱輻射模型至現有簡易二層法中，其結果顯示此熱輻射模型貼近 FDS 及實驗結果。
2. 實驗及 FDS 透過 N-percent method 得到之煙層高度，該方法受 N 值所採取之大小及熱電偶離火源之遠近影響，決定煙層高度判斷上之差異大小。
3. 本研究之第四版簡易二層法較第三版簡易二層法準確，其係因本研究之第四版簡易二層法熱輻射模型依據 Siegel and Howell 選用之封閉模型作居室內部空間配置(view factor)且考慮放射率及透射率相關設定較符實際狀況，而第三版簡易二層法則是以火源熱功率乘以 1/3 作為熱輻射損失估算。
4. 使用「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」進行居室性能驗證時，其判斷煙層下降過於嚴苛不符實際狀況，係因「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」之火源發熱量與其煙層密度使用定值直接作煙層下降之計算，而本簡易二層法之火源發熱量採  $T^2$  火災成長模式且密度根據理想氣體方程式隨溫度而變化，其結果與 FDS 比對後可知於小居室中簡易二層驗證技術係為較合理之驗證方式。
5. 簡易二層法夾層各情境中，其到達 1.8m 時間皆小於 FDS 到達 1.8m 時間，故可推斷本簡易二層法夾層情境之煙層高度計算結果皆較 FDS 安全性高，而情境一之計算方式採用 Roger H.[20]所提出之露台型煙流(Balcony spill plume)公式，多考量了煙流通過夾層邊緣所捲入之空氣造成煙生成率之增量，且在無防煙垂壁下其煙層下降時間最快，故可建議將此夾層情境計算方式納入目前簡易二層法中，以提供居室夾層較安全且合理之煙層下降驗證。

## 第五章 未來工作與建議

1. 與相關文獻之驗證結果顯示，考慮熱輻射之簡易二層法在煙層下降與溫度分布均較為準確，未來將依據現有熱輻射模型及本研究夾層之結果，導入動量方程將使預測更符實際狀況。
2. 探討自然排煙口中性層之物理現象，如下圖 5.1 所示，一般煙層界線(藍色實線)與中性層邊界線(紫色實線, Neutral axis)不一致，中性層係居室內壓力為零之邊界線，於中性層上方其居室內部壓力大於居室外部之大氣壓力，煙流向外流出；於中性層下方其居室內部壓力小於居室外部之大氣壓力，空氣將由居室外部向居室內補氣進入，若導入相關中性層之壓力項文獻經驗公式，並準確判斷排煙口中性層所在高度位置將可優化本程式於自然排煙口之計算結果。

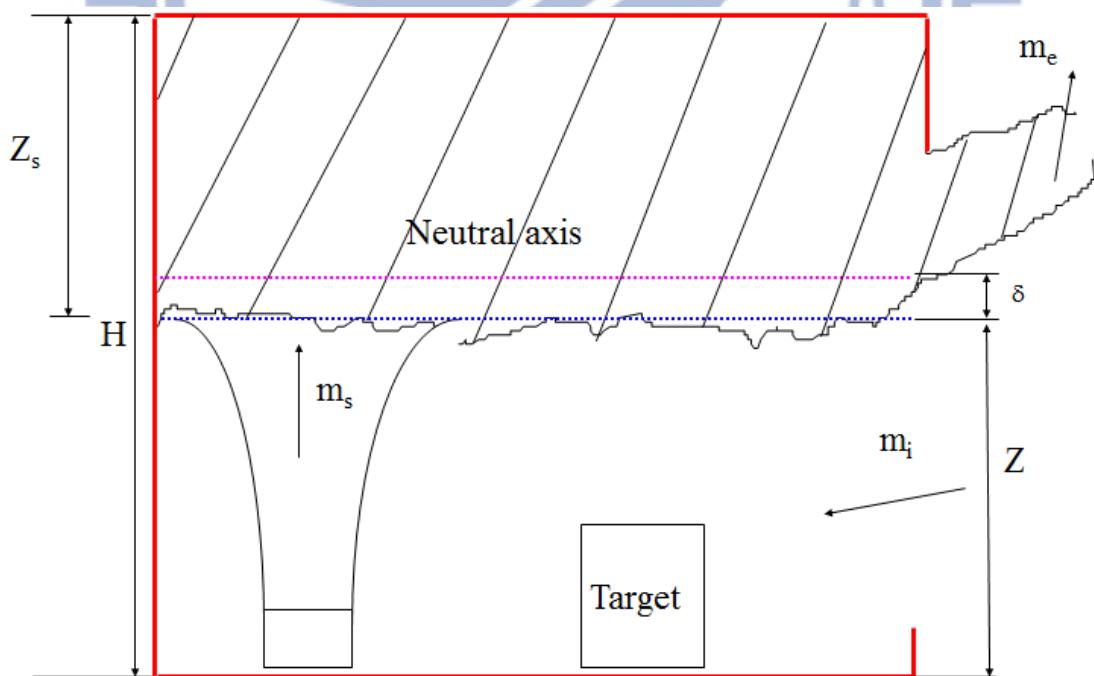


圖 5.1 居室內中性層與煙層示意圖

## 參考文獻

1. 「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」，內政部建築研究所,2009
2. L. Meng, W.K. Chow, "Mathematical Analysis and Possible Application of the Two-Layer Zone Model Firm", International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Vol.40, No 1, pp.13-22, 2002
3. Qidan Zhu, QiuHong Zhu, Chengtao Cai, "Simulation of Vessel's Cabin Fire Based on Two-layer Zone Model", Electronics, Communications and Control, pp.1669 – 1672, 2011
4. Keichi S, Kazunori H, Takeyoshi T, "A multi-layer zone model for predicting fire behavior in a single room," Fire safety science, Proceedings of the seventh international symposium, 2003
5. Chen Xiaojun, Yang Lizhong, Deng Zhihua, Fan Weicheng, "A multi-layer zone model for predicting fire behavior in a fire room," Fire Safety Journal, Vol.40, pp.267–281, 2005
6. Harada K, "Practical fire models used in building safety design," International Workshop on Practical Application of Computing Fire Models, 2006
7. L. Yi, W.K. Chow, Y.Z. Li, R. Huo, "A simple two-layer zone model on mechanical exhaust in an atrium," Building and Environment, Vol.40, pp.869-880, 2005
8. W.K. Chow, L. Yi, C.L. Shi, Y.Z. Li, R. Huo, "Mass flow rates across layer interface in a two-layer zone model in an atrium with mechanical exhaust system" Building and Environment, pp.1198-1202, 2006
9. R. Huo, W.K. Chow, X.H. Jin, Y.Z. Li, N.K. Fong, "Experimental

- studies on natural smoke filling in atrium due to a shop fire”Building and Environment, Vol.40, pp.1185-1193, 2005
10. Zukoski E.E, B.M. Cetuge, T.Kubota, “ Entrainment and Flame Geometry of Fire Plumes.”NBS-GCR-82-402, 1982
  11. NFPA 92B“Guide for Smoke Management Systems in Mall, Atria, and Large Areas”, National Fire Protection Association, 2000
  12. L.H. Hu, Y.Z. Li, R. Huo, L. Yi, W.K.Chow, “Full-scale Experimental Studies on Mechanical Smoke Exhaust Efficiency in an Underground Corridor”, Building and Environment,pp.1622-1630, 2006
  13. K.Y. Li, L.H. Hu, R. Huo, Y.Z. Li, Z.B. Chen, S.C. Li, X.Q. Sun, “A Mathematical Model on Interaction of Smoke Layer with Sprinkler Spray”, Fire Safety Journal, Vol.44, pp.96-105, 2009
  14. Frederick W. Mowrer, James A. Milke and Jose L. Torero, “A Comparison of Driving Forces for Smoke Movement in Buildings”, Journal of Fire Protection Engineering, Vol.14, pp.237-264, 2004
  15. Zhuman Fu, George Hadjisophocleous, “A two-zone “re growth and smoke movement model for multi-compartment buildings”, Fire Safety Journal, Vol.34,pp.257-285, 2000
  16. Walter W. Jones, Glenn P. Forney, “Improvement in predicting smoke movement in compartmented structures”, Fire Safety Journal, Vol.21,pp.259-297, 1993
  17. Chung Kee-Chiang, Wu Yu-Lieh, Tung Hsien-Sheng, “Fire Model Analysis and Experimental Validation on Smoke Compartments”, Journal of Fire Sciences, Vol.21, pp.203–226, 2003
  18. Shi Bing-Kai, “The Smoke Layer Descending Simulation in a Small Space by Using Two-Layer Zone Model ”,2012
  19. Petterson, N.M., Assessing the Feasibility of Reducing the Grid Resolution in FDS Field Modeling Fire Engineering Research Report (Master Thesis Supervised by Charley Fleischmaan),University of Canterbury, New Zealand, February 2002.

20. Roger Harrison, “Smoke Control in Atrium Building-A Study of the Thermal Spill Plume”, Fire Engineering Research Report (Master Thesis Supervised by Michael Spearpoint) University of Canterbury, New Zealand, July 2004.
21. Kumar S., “Air entrainment into balcony spill plumes”, Fire Safety Journal 45,pp.159-167,2010
22. L.Yi , “Study on effect of wind on natural smoke exhaust of enclosure fire with a two-layer zone model”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 119,pp.28-38,2013
23. Heskestad, G. “Engineering relations for fire plumes”, Fire Safety Journal 7, pp.25-32,1984
24. W.K. Chow, Y. Gao, “Buoyancy and inertial force on oscillations of thermal-induced convective flow across a vent”, Building and Environment, Vol.46, pp.315-323, 2011
25. Siegel R, Howell J, “Thermal radiation Heat Transfer(Third Edition) ”, 1983
26. Tanaka, Yamada. “BRI2002 : Two Layer Smoke Transport Model Fire Science and Technology”, 2003
27. Ryohei Mase , Jun-ichi Yamaguchi. “Evacuation Safety Verification Based on Smoke Layer Height”, J. Environ. Eng., AIJ, Vol.75 No.652, pp-481-490, Jun, 2010
28. Chen Xiaojun, “Simulation of temperature and smoke distribution of a tunnel fire based on modifications of multi-layer zone model ”,2007