

提升室內空氣品質之空調風口 配置設計基準計畫

內政部建築研究所委託研究報告
中華民國 96 年 11 月

提升室內空氣品質之空調風口 配置設計基準計畫

計畫主持人：何明錦 所長
共同主持人：鍾基強 教授
研究員：王佑萱
研究員：吳友烈

內政部建築研究所委託研究報告
中華民國 96 年 11 月

目 錄

第一章 緒論	01
1.1 計畫背景與目的	01
1.2 研究內容	02
1.3 研究方法與進行步驟	03
第二章 通風換氣空氣品質數學模式之分析與建立	06
2.1 室內空氣污染物之來源與特性	06
2.2 室內空氣污染物濃度之預測	11
2.3 室內空氣品質問題診斷與控制策略	14
2.4 室內空氣品質數學模式	17
2.5 通風換氣與換氣理論	25
2.6 空氣年齡理論	27
2.7 空氣交換效率與通風效率理論	30
第三章 建築物進氣與排氣對外開口設計策略	32
3.1 地表風速特性	32
3.2 建築物所受風力	34
3.3 建築物的風壓判定	40
3.4 風壓係數	41
3.5 進氣與排氣對外開口配置之原則	43
3.6 國外規範介紹	48
第四章 實驗分析	50
4.1 實驗目的	50
4.2 實驗操作流程	51
4.3 實驗設備說明	52
4.4 實驗結果說明	58
第五章 進排氣口配置對空氣品質影響之數值模擬分析	59
5.1 室內通風策略模擬分析規劃	59

5.2 數值模擬之數學模式	62
5.3 數值模擬之數值方法	64
5.4 邊界條件設定	68
5.5 格點系統設定	70
5.6 外風場對空調風口對外開口影響之模擬設定	73
第六章 結果分析與討論	75
6.1 室內空調通風之氣流速度	75
6.2 室內空調通風之污染物移除效率與分布	78
6.3 室內空調通風污染物移除效率與分布模擬與實驗之比較 ...	101
6.4 外風場對空調風口對外開口影響之模擬結果	104
第七章 結論及建議.....	106
7.1 結論	106
7.2 建議	107
參考文獻	108
附件一	110

表 次

表 2-1 室內空氣污染源與主要污染物質.....	8
表 2-2 二氧化碳濃度與人體生理狀況之關係.....	9
表 2-3 二氧化碳濃度空氣污染指標.....	9
表 2-4 NIOSH 調查室內空氣品質問題之型態.....	14
表 2-5 七種常用的空調系統及污染物濃度方程式.....	24
表 3-1 地況分類與指數 α 值之關係.....	33
表 3-2 建築物外牆的風壓係數.....	42
表 4-1 探討案例個數分析表.....	53
表 4-2 不同的作業環境訂出了最小通風率的建議(ASHRAE).....	53
表 4-3 各種案例之通風效率比較.....	58
表 5-1 探討案例個數分析表.....	60
表 5-2 數值模擬之基本假設.....	69
表 6-1 各種案例之通風效率.....	83
表 6-2 實驗與模擬各種案例之通風效率比較.....	103

圖 次

圖 1-1 研究計畫進行步驟.....	5
圖 2-1 居室空間之循環式空調通風與氣體污染物產生源式意圖.....	13
圖 2-2 污染物質質量平衡模型.....	18
圖 2-3 空氣污染物濃度模型.....	20
圖 2-4 濕度模型.....	21
圖 2-5 室內空氣污染物濃度及濕度效應模型.....	22
圖 2-6 室內二氧化碳與換氣率的關係.....	26
圖 2-7 機械式通風模式之空氣年齡與駐留時間的關係.....	29
圖 2-8 空氣進入室內空間中 P 點得機率分佈曲線圖.....	29
圖 3-1 不同地況之風速分布.....	34
圖 3-2 下切氣流之示意圖.....	35
圖 3-3 建築物尾流之示意圖.....	36
圖 3-4 穿堂風示意圖.....	36
圖 3-5 建築物角隅強風示意圖.....	37
圖 3-6 角隅渦流發生處.....	37
圖 3-7 遮蔽效應之示意圖.....	38
圖 3-8 金字塔效應示意圖.....	38
圖 3-9 縮流效應示意圖.....	39
圖 3-10 渠化效應示意圖.....	40
圖 3-11 在高層建築上不同風向的平均壁壓.....	42
圖 3-12 排氣塔與進氣口距離形成與循環氣流區域之關係.....	44
圖 3-13 排氣口受到向下氣流而降低有效排氣高度示意圖.....	45
圖 3-14 矩形建築物周圍外風場之氣流流型.....	47
圖 3-15 建築物尺寸與建築物表面之氣流流型.....	48

圖 4-1 實驗空間尺寸示意圖.....	50
圖 4-2 實驗操作流程.....	51
圖 4-3 實驗空間實際外觀圖.....	52
圖 4-4 無段變頻式風機.....	54
圖 4-5 ALNOR 風罩式風量計.....	55
圖 4-6 TSI 風速/溫濕度計.....	55
圖 4-7 ALNOR Model 8650 型 CO ₂ 濃度測棒.....	55
圖 4-8 奧地利 E+E CO ₂ 濃度感測器.....	55
圖 4-9 GMW22 型 CO ₂ 濃度感測器.....	55
圖 4-10 資料擷取器 Fluke NetDAQ Logger Model 2640A 型.....	56
圖 4-11 CO ₂ 氣體鋼瓶.....	56
圖 4-12 出風口 1 尺寸示意圖.....	56
圖 4-13 出風 2 尺寸示意圖.....	57
圖 4-14 回風口 1.2 尺寸示意圖.....	57
圖 4-15 實驗空間 CO ₂ 濃度感測器量測位置示意圖.....	57
圖 5-1 模擬空間尺寸示意圖.....	59
圖 5-2 STAR-CD 計算流程.....	61
圖 5-3 XY 平面網格示意圖.....	71
圖 5-4 YZ 平面網格示意圖.....	71
圖 5-5 XYZ 平面網格示意圖.....	72
圖 5-6 外風場空間尺寸與建築物位置示意圖.....	73
圖 5-7 XY 網格配置示意圖.....	74
圖 5-8 XZ 網格配置示意圖.....	74
圖 6-1 進氣口 1-6ACH 各量測點氣流速度模擬結果.....	76
圖 6-2 進氣口 1-12ACH 各量測點氣流速度模擬結果.....	76

圖 6-3 進氣 2-6ACH 各量測點氣流速度模擬結果.....	77
圖 6-4 進氣 2-12ACH 各量測點氣流速度模擬結果.....	77
圖 6-5 case1-1-6ACH 0~1200 秒之 CO ₂ 濃度變化曲線圖.....	79
圖 6-6 case1-1-12ACH 0~1200 秒之 CO ₂ 濃度變化曲線圖.....	79
圖 6-7 case1-2-6ACH 0~1200 秒之 CO ₂ 濃度變化曲線圖.....	80
圖 6-8 case1-2-12ACH 0~1200 秒之 CO ₂ 濃度變化曲線圖.....	80
圖 6-9 case1-3-6ACH 0~1200 秒之 CO ₂ 濃度變化曲線圖.....	81
圖 6-10 case1-3-12ACH 0~1200 秒之 CO ₂ 濃度變化曲線圖.....	81
圖 6-11 case1-4-6ACH 0~1200 秒之 CO ₂ 濃度變化曲線圖.....	82
圖 6-12 case1-4-12ACH 0~1200 秒之 CO ₂ 濃度變化曲線圖.....	82
圖 6-13 Case 1-1-6ACH 8 100~1200 秒空間之 CO ₂ 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	84
圖 6-14 Case 1-1-12ACH 100~1200 秒空間之 CO ₂ 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	85
圖 6-15 Case 1-2-6ACH 100~1200 秒空間之 CO ₂ 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	86
圖 6-16 Case 1-2-12ACH 100~1200 秒空間之 CO ₂ 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	87
圖 6-17 Case 1-3-6ACH 100~1200 秒空間之 CO ₂ 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	88
圖 6-18 Case 1-3-12ACH 100~1200 秒空間之 CO ₂ 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	89
圖 6-19 Case 1-4-6ACH 100~1200 秒空間之 CO ₂ 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	90
圖 6-20 Case 1-4-12ACH 100~1200 秒空間之 CO ₂ 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	91
圖 6-21 Case 2-1-6ACH 100~1200 秒空間之 CO ₂ 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	92
圖 6-22 Case 2-1-12ACH 100~1200 秒空間之 CO ₂ 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	93
圖 6-22 Case 2-1-12ACH 100~1200 秒空間之 CO ₂ 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	94
圖 6-23 Case 2-2-6ACH 100~1200 秒空間之 CO ₂ 濃度分佈情形	

(Z=1.25M 截面).....	95
圖 6-24 Case 2-2-12ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	96
圖 6-25 Case 2-3-6ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	97
圖 6-26 Case 2-3-12ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	98
圖 6-27 Case 2-4-6ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	99
圖 6-28 Case 2-4-12ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面).....	100
圖 6-29 進、回風口 1-1-6ACH、12ACH 實驗與模擬之空間平均濃度 衰減曲線.....	101
圖 6-30 進、回風口 1-2-6ACH、12ACH 實驗與模擬之空間平均濃度 衰減曲線.....	101
圖 6-31 進、回風口 2-1-6ACH、12ACH 實驗與模擬之空間平均濃度 衰減曲線.....	102
圖 6-32 進、回風口 2-2-6ACH、12ACH 實驗與模擬之空間平均濃度 衰減曲線.....	102
圖 6-33 背風面-進排氣口位置在同側之流場示意圖.....	103
圖 6-34 迎風面-進排氣口位置在同側之流場示意圖.....	104
圖 6-35 背風面進氣-上方排氣之流場示意圖.....	104

摘 要

關鍵詞：空調風口配置、室內空氣品質、污染物移除效率、通風效率

一、 研究緣起

建築物室內環境與節能之課題近來漸漸受到社會及政府單位之注意，尤其室內環境好壞直接影響人的健康與生產力，而好的室內環境如何在最經濟最有效的通風系統下達成，則為建築物室內環境設計之重大挑戰。建築物之空調風口配置等通風模式會影響室內通風氣流之型態，相對會影響室內空氣品質與熱環境。

傳統室內環境及室內空氣品質之研究，目前仍侷限於採用定量換氣量做為維持室內新鮮外氣空氣量，然而建築物內之通風條件會嚴重影響室內空氣品質，尤其是室內進風口與排風口相對位置，國內許多建築物常常發現室內進風口與出風口位置設計不良或選用之出風口型式不適當造成短循環或室內氣流流動受限，因此雖然有足夠的換氣量，但仍無法將室內所產生的空氣污染物或熱負載移除，造成室內空氣品質不理想。此外建築物進風與出風對外開口相對位置如果間距不足又無適當之擋風或導引裝置，排氣口排出之氣體亦有可能會受外風場作用而又導入外氣進氣口。但國內的建築技術規則並未就相關盲點進行規範，因此本研究主要針對進風與排風對外開口及室內進風口與出風口相對配置對室內環境品質影響進行評估研究。

二、 研究方法與過程

本計劃案主要探討欲達到未來法規所要求室內空氣品質建議值

之室內空調通風系統設計有關風口配置之相關基準，研究內容包括兩大部分：1.探討整棟建築物進風口與回風口對外開口位置之探討、2.共用風管接進室內時，以單一區劃空間探討進風口與回風口相對配置設計對室內空氣品質之影響。主要以空氣污染物移除率為主，進行室內空氣品質指標之比較分析，以瞭解在何種空調風口配置設計下可以達到最經濟、最有效及可接受之室內空氣品質。有關本部分計畫之主要工作內容及進行步驟如下所述：

1.收集並整理有關通風空調系統設計及使用條件限制之資料

本項工作進行相關文獻之收集與整理，以瞭解國內外目前針對符合室內空氣品質之空調通風系統設計之規範與要求。

2.通風換氣空氣品質數學模式之分析與建立

室內空氣品質的預測是由污染源、污染物吸附、室內空氣流動及室內與室外間空氣流動等因素所決定。在室內環境中，為了瞭解室內空氣污染物的產生、擴散與衰減，常利用室內空氣品質模型(Indoor Air Quality Models)來預測室內空氣污染物濃度，包括決定論模型(Deterministic Models)、經驗模型(Empirical models)與前兩者的結合。

3.進行電腦數值模擬分析與全尺寸實驗驗證

本計畫主要針對不同空調風口配置對室內空間氣流環境之影響進行探討，利用 CFD 進行室內空間氣流與濃度分佈的模擬分析，配合後續全尺寸實驗進行該空間的氣體污染物分佈實測，比較兩者間的差異性。藉此模擬與實驗結果可進一步瞭解進排氣口相對位置的不同配置與室內空氣品質的相關性。

4.進行實際案例之改善分析

對於因空調風口配置不當導致室內 IAQ 不佳之建築物案例透過

數值模擬與實驗量測分析，進行風口配置之調整、改善室內空氣品質。

三、 重要發現

要維持或是改善建築物室內之空氣品質，除本身建築物建材與裝修及傢俱須注意慎選外，建築物本身之空氣調節與通風設備扮演重要角色，而目前國內環保署正積極推動室內空氣品質法進行建築空間內空氣品質之要求，以確保建築物內人員之健康。然而目前建築相關法規對於空氣調節與通風設備等之設計或設計之要求僅止於通風量（建築技術規則建築設計篇第 102 條），依據建築物之用途使用空間規定最小之通風量。

由本計劃研究結果可以發現無論是全尺寸實驗或是數值模擬，建築物室內空氣品質除了受到外氣通風量大小影響外（換氣次數），空調通風口之相對配置位置所形成之氣流路徑對室內空氣品質影響更為顯著，因此進行建築物之空調通風系統設計或配置，除了法規所要求之通風量外風口設置之位置，還需考慮其適當之風口設計位置。

除了建築物室內之空調風口配置外，本研究亦發現若建築物空調風口對外開口設置位置不當，亦有可能直接將室外之汙濁空氣帶入或是將原先排出之廢待再次吸入造成二次污染。

四、 主要建議意見

◆ 中長期可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

建議內容：

建議內容：

為確實提昇建築物室內空氣品質，確保國人健康，建築物內之空氣調節與通風設備設置除法規要求之通風量外，建議應導入污染物移除效率作為室內空氣品質評估指標，同時應對於相關從業人員（建築設計人員、空調設計人員、室內裝修人員等）宣導或教育訓練，適當空調風口配置對於室內空氣品質影響之關係與重要性。

ABSTRACT

Keywords : vent arrangement, indoor air quality, contaminant removal efficiency, ventilation efficiency

The indoor environment and energy saving problems are taken more attention than usually. Especially, the indoor environment may affect the health of human resource and productivity. How optimal indoor ventilation may be achieved using good level of energy is a change for building designers. The indoor ventilation pattern will influence the indoor air quality and thermal environment. The relative location of diffuser affects the flow pattern severely.

The different location of indoor diffusers and types will influence the indoor environment. Thermal comfort and indoor air quality are major investigated parameters. To understand what kind of ventilation system and diffuser types can provide the best indoor environment under the economize rules.

Both the numerical simulation and full-scale experimental program will adopt in this project. The CO₂ will be the indoor contaminant index. Also, tracer gas technique will be used for evaluate the ventilation efficiency. The project is to investigate the how the ventilation patterns affect indoor environment. The research topics are depicted detailed as following:

- 1.Established contaminant removal efficiency and contaminant distribution model. Also, the effect of different location of diffusers on indoor environment will study numerically.
- 2.Referred from referred reports to find a inappropriate ventilation indoor environment and followed the CFD simulation results to do the retrofit analysis. Also, measured the indoor air quality both before-improvement and after-improvement to verify the vent design for good indoor air quality environment.

第一章 緒論

1.1 研究背景與目的

建築物室內環境與節能之課題近來漸漸受到社會及政府單位之注意，我國隨著高度的經濟成長，國人生活文化與生活習慣的急速變遷，造成都市人口集中，無論工作、生活停留在辦公室、工廠、住宅和娛樂場所等室內環境的時間，遠超過停留在戶外的時間，因此室內整體空氣品質自然成為影響人體健康與舒適程度的重要因素。尤其建築物室內環境好壞直接影響人的健康與生產力，例如：室內空氣品質 (IAQ)、熱舒適等指標，而好的室內環境如何在最經濟最有效的通風系統下達成，則為建築物室內環境設計之重大挑戰。

依據美國冷凍空調協會(ASHRAE)於 62-2001【1】之要求，居室空間內需安裝通風系統，以便通風空氣能供應整個居室環境。而在進行通風系統模式之設計時，室內空氣品質及通風效益之評估相當重要。影響室內空氣品質的污染源不外乎人體呼出之二氧化碳及室內家具產生之有機物質與溫濕度的影響。一般室內空氣品質的問題，如室內換氣不足、室內有機物散逸過高不易排除、溫濕度條件不良造成生物性污染物過多等現象，都關係著室內人員的健康。

傳統室內環境及室內空氣品質之研究，目前仍侷限於採用定量換氣量做為維持室內新鮮外氣空氣量，以減少疾病感染，避免建築物內使用者之健康遭受威脅，如美國冷凍空調協會(ASHRAE)於 62-2001 即要求每人 20CFM 新鮮外氣量。室內通風條件會嚴重影響室內空氣品質，尤其是室內進風口與排風口相對位置，國內許多建築物常常發現室內進風口與出風口位置設計不良或選用之出風口型式不適當造成短循環或室內氣流流動受限，因此雖然有足夠的換氣量，但仍無法將室內所產生的空氣污染物或熱負載移除，造成室內空氣品質不理

想。此外建築物進風與出風對外開口相對位置如果間距不足又無適當之擋風或導引裝置，排氣口排出之氣體亦有可能會受外風場作用而又導入外氣進氣口。但國內的建築技術規則並未就相關盲點進行規範，因此本研究將針對進風與排風對外開口及室內進風口與出風口相對配置對室內環境品質影響進行評估研究。

1.2 研究內容

環保署預計近年內公告室內空氣品質法，初步將依相關空氣品質標準針對公共場所之空氣品質進行管理與要求，而本研究探討欲達到環保署公告之室內空氣品質建議值（如附件一）之空調通風系統設計有關風口配置之相關基準，研究內容將包括兩大部分：(1)共用風管接進室內時，以單一區劃空間探討進風口與出風口相對配置設計對室內空氣品質之影響、(2)針對風口設計不當、室內空氣品質不佳之實際建築物空間進行實例改善探討，利用 CFD 模擬所找出來的最佳風口配置實際應用至實例進行改善，透過實際量測分析去比較改善前後 IAQ 之差異性。

本研究將從保護國民健康之觀點，基於建築環境應至少滿足健康舒適之需求所需之通風模式策略，將針對室內單一空間環境下，不同進排氣口對外開口位置、室內進回風口相對位置、通風換氣量等的不同，比較室內環境品質之差異，研究將同時採用電腦數值模擬與實驗驗證兩方法。

近年來通風系統之電腦數值模擬預測方法已成為研究之主流。先進的電腦模擬技術已用來預測室內空氣的流動狀況，並且被用在熱舒適性及室內空氣品質之研究上，本研究將建立不同通風模式之電腦數值模擬預測技術，針對室內氣流污染物及熱舒適度等進行模擬預測，利用室內氣流場分佈及污染物濃度衰退情形之模擬結果計算室內通

風效率，評估進排氣口的設計對室內空氣品質的影響。全尺寸實驗採用二氧化碳當作室內空氣污染物指標，同時利用示蹤氣體技術(Tracer gas techniques)進行室內換氣率(ACH)之實測與通風效率(Ventilation efficiency)評估，另外量測室內氣流變化情形，並與數值模擬結果比對分析，比較不同空調風口配置設計對於室內污染物排除效率與舒適性影響的差異，以期達找出最適化室內環境品質之通風模式策略之目的。

1.3 研究方法與進行步驟

本計畫進行最適化室內空氣品質之空調通風口配置設計分析與研究，一般通風空調系統往往僅考量提供最低之換氣次數，並未對通風模式策略（包含整棟建築物進風口與回風口對外開口位置及室內進/回風口之相對配置等）對室內氣流類型及污染物稀釋移除效率做通盤之考量。本計劃將同時採用電腦數值模擬與實驗驗證兩方法，在全尺度實驗室設計不同進/回風口之配置以追蹤氣體法量測室內二氧化碳之衰退情形，並透過溫度、風速及溼度等參數之量測，瞭解室內有效通風狀況及空氣污染物稀釋移除效率與熱舒適程度，同時驗證電腦模擬模式之準確性。

計畫案分為三個部分進行，第一部分為收集整理目前國內外針對符合室內空氣品質之空調通風系統設計之規範與要求，並建立通風換氣空氣品質與污染物移除效率及濃度分布預測等模式，最後並透過計算流體力學軟體(CFD)進行在不同通風模式下之室內環境流場分析，同時輔以污染擴散及移除模式，以瞭解污染物的分佈進而計算通風效率，並找出最佳通風模式的設計參數，包括進、排氣口位置與換氣量。

第二部分為最佳通風系統配置之全尺寸實驗驗證。透過全尺寸實驗分析在不同送/回風口配置之通風系統下，對室內空氣品質及熱舒適

性的的差異性，找出之最佳送/回風口配置之通風系統，同時驗證電腦模擬模式之準確性。

第三部分為實例之改善分析。選取因空調風口配置設計不當導致室內空氣品質不佳之實際建築物案例，利用 CFD 模擬所找出來的最佳風口配置實際應用至此建築物空間進行改善，並透過全尺寸實際量測分析去比較風口配置改善後室內空氣品質改善之差異性。

有關本計畫之主要工作內容及進行步驟如下所述：

1.收集並整理有關通風空調系統設計及使用條件限制之資料

本項工作進行相關文獻之收集與整理，以瞭解國內外目前針對符合室內空氣品質之空調通風系統設計之規範與要求。

2.通風換氣空氣品質數學模式之分析與建立

室內空氣品質的預測是由污染源、污染物吸附、室內空氣流動及室內與室外間空氣流動等因素所決定。在室內環境中，為了瞭解室內空氣污染物的產生、擴散與衰減，常利用室內空氣品質模型(Indoor Air Quality Models)來預測室內空氣污染物濃度，包括決定論模型(Deterministic Models)、經驗模型(Empirical models)與前兩者的結合。

3.進行電腦數值模擬分析與全尺寸實驗驗證

本計畫主要針對不同空調風口配置對室內空間氣流環境之影響進行探討，利用 CFD 進行室內空間氣流與濃度分佈的模擬分析，配合後續全尺寸實驗進行該空間的氣體污染物分佈與溫、溼度實測，比較兩者間的差異性。藉此模擬與實驗結果可進一步瞭解進排氣口相對位置的不同配置與室內空氣品質的相關性。

4.進行實際案例之改善分析

對於因空調風口配置不當導致室內 IAQ 不佳之建築物案例透過數值模擬與實驗量測分析，進行風口配置之調整、改善室內空氣品質。

本研究計畫進行步驟如圖 1-1 所示。

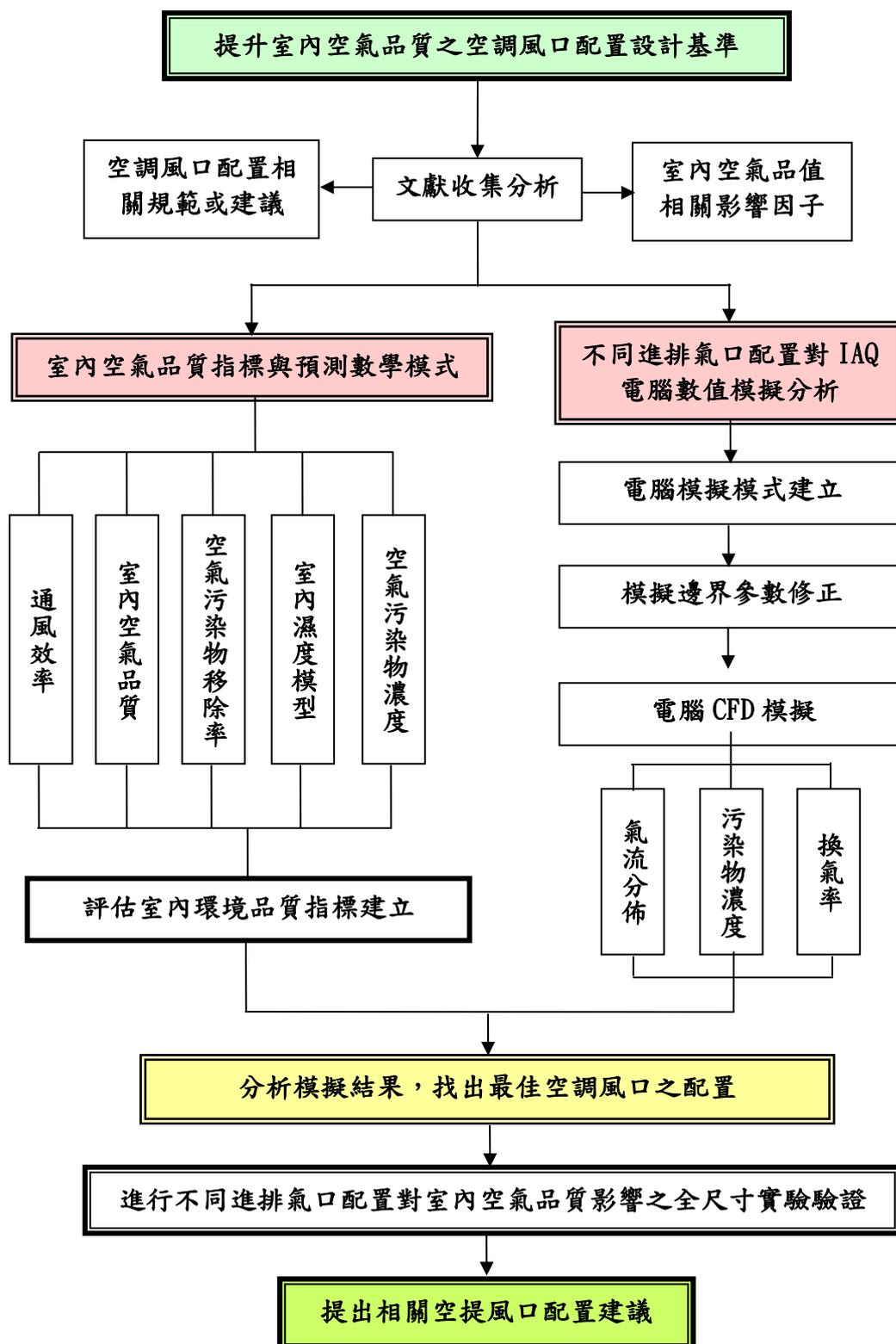


圖 1-1 研究計畫進行步驟

第二章 通風換氣空氣品質數學模式之分析與建立

本計劃目的主要是探討符合室內空氣品質條件下，空調風口應有之配置。欲瞭解室內環空氣品質之好壞必須透過相關之理論分析與整合，建立有效之評估模式，同時也必須針對影響室內空氣品質之因子及其來源與特性進行探討。

室內空氣品質一般皆採用空氣污染物模型，包括產生、稀釋與移除等，本研究先以 ASHRAE Standard 62-2001【1】中提供空調設計師之室內空氣品質程序為發展之基準，由基本理論出發，透過空間內之整體空氣品質模式建立，對影響室內整體空氣品質之因子特性進行分析與瞭解，並以室內空氣污染物濃度與所需要的通風量相互關係為起點，進而擴大到通風換氣模式對空氣品質因子之關連性，而舒適度指標需考慮空間溫度、濕度之因子後才能進一步建立舒適度相關指標。

2.1 室內空氣污染物之來源與特性

2.1.1 室內空氣污染物

室內的空氣污染源主要來自外氣、室內人員、燃燒器具與日用品，另建築材料、家俱與有機物(如腐敗之食物)亦會產生空氣污染物，室內空氣污染物來源與其主要污染物質【2】如表 2-1 所示，由此表可知室內一氧化碳來源有外氣、燃燒與抽煙三項；二氧化碳除燃燒與抽煙外，室內的主要污染來自人體代謝作用；粉塵的污染源具多樣性，而各種污染源排放的粉塵種類不同。

如何排除室內空氣污染物是維持室內空氣品質之主要，一般降低室內空氣污染物的作用主要有下列三項：

- 1.藉由通風設備排除於室外大氣中
- 2.藉化學反應而轉化成無害之物質
- 3.吸附於物質表面

至於何種作用則須視污染物的性質、環境條件及通風換氣作用而定；因此控制室內空氣品質，須對污染物的特性有透徹的瞭解，才能在事先控制某發生量；事後擬定正確而有效率的控制對策。

茲針對一氧化碳、二氧化碳與粉塵等室內常見之空氣污染物的特性說明如下：

1. 一氧化碳

一氧化碳是一種無色、無味的氣體，低濃度情況下便有毒，主要是燃燒不完全而產生。一氧化碳性質相當安定不易變化，在陽光下的分解速率約 0.001hr^{-1} ，不易以吸附作用消除。

2. 二氧化碳

二氧化碳(CO_2)是一種無色無味的氣體，性質安定不易變化，為碳原子(C)進行氧化作用後的產物，綠色植物行光合作用的主要元素之一，這也是自然消除 CO_2 的主要作用。因此 CO_2 在室外並非空氣污染物，但在室內由於濃度過濃將會造成人體不適的現象，因此針對室內可將其視為空氣污染物。

3. 浮游粉塵

浮游粉塵是具有複雜的化學組成的微粒，其化學成份是對人體產生不良影響的主因，如溶有毒性氣體的液態微粒或纖維狀粉塵；其具有與它種物質表面(如壁體、器具)或粒子間互相結合之現象，謂之附著作用；而水滴或與帶靜電物體亦易吸附粉塵；除此之外，浮游粉塵尚有因自重而沉澱之特性，使粉塵濃度自然降低， $10\ \mu\text{m}$ 以下之微粒自然沉澱率約為 0.05hr^{-1} 。

本研究將以二氧化碳當作室內空氣污染指標，因此對其特性與對人體健康的影響必須要有基本的認識，才不至於造成疏失，影響身體健康與實驗結果的錯誤。以下就針對其性質與對人體健康的影響做一

簡單的敘述。

二氧化碳基本上不具毒性，在性質上對人體無害，但在門窗關閉、換氣不良的室內，室內人員多數聚集的場所，二氧化碳濃度升高，血液變酸而易疲倦，使工作效率降低。因此針對室內而言，CO₂ 可以視為污染物，為了人體健康著想必須考量其濃度值在合理範圍之內。

表 2-1 室內空氣污染源與主要污染物質

來源類別	污染來源	污 染 物 質
滲入外氣	汽機車排放廢氣	一氧化碳、粉塵、氮氧化物、硫氧化物、鉛、臭氧
	工廠	一氧化碳、粉塵、氮氧化物、硫氧化物、光化學性高氧化物(臭氧)、鉛
	營建工地及其它	粉塵、細菌、花粉粒、濕氣
室內人員	人體	體臭、二氧化碳、氨、水蒸氣、頭皮屑、細菌
	人員活動	砂塵、纖維、黴菌、細菌
	香煙	粉塵、一氧化碳、二氧化碳、氨、氮氧化物、碳氫化合物、各種致癌物質
空調系統	空調箱(過濾網)	霉菌、虱蚤類、細菌、臭味
	風管	粉塵、纖維、霉菌、虱蚤類、細菌
燃燒器具與用品	事務機器(影印機、清靜機等)	氨、臭氧、溶劑類、塵粒、粉墨粒
	燃燒器具(瓦斯爐、熱水器等)	二氧化碳、一氧化碳、氮氧化物、碳氫化合物、粉塵、煙粒子、燃燒核
	殺蟲劑類	噴射劑，殺蟲劑、殺菌劑、殺鼠劑、防蠅劑
建築材料	室內建築材料	甲醛、石棉纖維、接著劑(苯類)、油漆(苯類)、地毯纖維毛絮、黴菌、浮游細菌、壁蝨
	維修保養	溶劑、洗劑、砂塵、臭菌
有機物質	室內有機物質	腐壞食物(黴菌、臭味)、植物花草(花粉粒)、潮濕物(黴菌、臭味)、排泄物(細菌、臭味)

表 2-2 是室內二氧化碳濃度與人體生理狀況之關係。CO₂ 濃度在 600ppm 以下室內人員不會產生不適的症狀，而 1000ppm 以上則常有頭痛、昏睡等症狀發生；此外，CO₂ 濃度增高，可能該室之空氣亦已污濁，含大量其它空氣污染物，因此易引起呼吸器官疾病或神經中樞之傷害。表 2-3 是 CO₂ 濃度空氣污染指標，顯示一般室內空氣中二氧化碳濃度常以 700~1000ppm 或 1000ppm 以下作為基準。

表 2-2 二氧化碳濃度與人體生理狀況之關係

二氧化碳濃度(ppm)	對人體生理之影響
≤600	無
600~1000	偶而抱怨頭痛、昏睡、悶熱
1000~10000	呼吸系統、循環系統及大腦之機能上受到影響
10000~30000	呼吸增大及臉上有溫熱感
30000~40000	耳鳴、頭痛及血壓上升
40000~60000	皮膚血管擴張、噁心、嘔吐
70000~80000	精神活動混亂、呼吸困難
80000~100000	意識混濁而發生呼吸停止
100000~200000	中樞傷害的發生，構成生命的危險

表 2-3 二氧化碳濃度空氣污染指標

濃度(ppm)	意義
700	多數人長時間在室內的濃度限制
1000	一般場合之濃度限制
1500	在換氣計算使用之濃度限制
2000~5000	被認為相當不良之濃度值
5000 以上	被認為有害的濃度
備註	非 CO ₂ 自身有害之濃度，而是假定空氣的物理性狀、化學性狀與 CO ₂ 濃度成比例之污染濃度限制標準

2.1.3 室外空氣污染物

室外空氣污染物亦是影響室內空氣品質主要因子之一，尤其隨著經濟迅速發展，無論是工業生產所產生之污染物或是汽機車廢氣排放所造成的汙染，對於座落於附近的建築物進行室內外空氣交換過程

中，室外空氣污染物影響相當大，往往造成室內空氣品質不良。

空氣中含有固定量的氮(78%)氧(21%)氫(0.9%)與會隨著地方不同而改變數量的二氧化碳(約 0.03%)，還包括一些微量的惰性氣體(氖、氬、氪、氙...等等)。除了上述列出的這些氣體之外通常我們都視為空氣污染物，這些污染物濃度幾乎都很小但是可能會對於建築室內人員和建築材料或內部物質有嚴重的影響，而去除這些污染物氣體或是避免其進入建築物室內影響空氣品質對於我們而言相形重要且必須。

傳統上，室內氣體污染物透過通風方式所引進之室外空氣加以稀釋與控制，但是有時因為建築物所處位置（工業區或交通密集區）或是外氣進風口位置設計不當的關係，造成所引進利用的室外空氣也可能包含超過危害臨界濃度的氣體污染物。因此在引進外氣進行空調通風換氣之前需要藉由氣體污染物移除設備來處理這些污染物，除此之外，也可利用最小的外氣引進量再利用較大量的循環回風和過濾來達到節約能源的效果【3】。

2.1.4 氣體污染物

空調通風區域或人員所在空間中之空氣含有有害或是對人有影響之氣體，是我們從空氣氣流中移除氣體污染物的主要原因。不同的污染物在不同的濃度條件下會有顯著不同的影響。一般氣體污染物具有四種有害的狀況：包括毒性、氣味、刺激及材料損害。在大部份的情形下，氣體污染物對人類到達具危害性的臨界值之前，即會因為其臭味或是刺激性造成人員不舒服。

但也有例外，有些氣體污染物在到達具危害性的臨界值之前是很難去察覺，例如具潛在致命毒性之一氧化碳氣體本身並無氣味。其它非工業污染物的來源包括：典型香菸所產生的主要污染物一煙、建築材料產生的氣體污染物、室內燃燒設備產生之氣體污染物及人體散發

氣體污染物等。

2.2 室內空氣污染物濃度之預測

Meckler 和 janssen【4】建立一個數學模式，可以用來計算室外污染對室內的空氣品質影響程度。一循環空調通風案例之示意圖如圖 2-1 所示。在此案例中顯示通風稀釋混合並不完全，主要原因是水平虛線靠近天花板之區域範圍內，空氣從出風口直接又回到回風口位置，並未對室內空間之空氣進行混合稀釋。有效通風係數 E_v 是指供應至室內空間進行空氣混合之空氣量與未進入室內空間直接沿著天花板回到回風口之空氣量的比值。Meckler 和 janssen 建議有效通風係數 E_v 為 0.8。

在室內空間中的任何人員皆是氣體污染物的產生源，在空調通風空間中穩定狀態之污染物濃度為(a)所有進入空間或於空間中產生之污染物總和除上(b)通風換氣量。穩定狀態下單一成分之污染物濃度可以表示成【4】：

$$C_{ss} = a/b \quad (2-1)$$

其中：

$$a = C_x(Q_i + 0.01PE_vQ_v / f) + 2119(G_i + NG_o) \quad (2-2)$$

$$b = Q_e + Q_h + Q_L + k_dA + NQ_o(1 - 0.01P_o) + (E_vQ - Q_v)(1 - 0.01P_o) / f \quad (2-3)$$

A ：通風內部空間污染物被吸附的表面積； m^2

C_{SS} ：穩態室內污染物濃度； mg/m^3

C_x ：室外污染物濃度； mg/m^3

E_v ：有效通風係數

$f = 1 - 0.01P(1 - E_v)$

G_i ：非人員所產生之污染物產生率； mg/s

G_o ：人員所產生之污染物產生率； mg/s

k_d ：污染物沉澱之速度； m/s

N：空間中人員數量

P：污染物通過濾網之穿透率；%

P_0 ：污染物通過人員肺部之穿透率；%

Q：總流量； m^3/s

Q_e ：排氣量； m^3/s

Q_h ：氣罩流量； m^3/s

Q_i ：室外滲透進室內之流量； m^3/s

Q_L ：室內滲漏（滲出）至室外之流量； m^3/s

Q_0 ：單一人員平均呼吸量； m^3/s

Q_v ：通風進氣之空氣流量； m^3/s

連續的流動狀態可以簡化 b 表示成下列關係式，如此可以較容易進行流量計算。

$$b = Q_i + Q_v + k_d A + NQ_0(1 - 0.01P_0) \quad (2-4)$$

此數學模式的參數一定要小心的判斷決定，有些不重要的可以被忽略。舉例來說，室內滲漏至室外之流量 Q_L 可以包括從煙囪或廁所排氣口流出的流量。

對於設計者而言如能掌握穩態中的室內氣體污染物濃度是很有幫助的，如此也可以有助於了解當條件突然改變時氣體污染物濃度會如何快速地變化。對於圖 2-1 的建築物之動態方程式可以表示成：

$$C_t = C_{ss} + (C_0 - C_{ss})e^{-b\theta/V} \quad (2-5)$$

其中：

V：通風空間容積； m^3

C_0 ：在時間內的空間濃度 $\theta=0$

C_t ： θ 改變條件之後數分鐘的空間濃度

由方程式(2-1)計算所得之 C_{ss} ，和方程式(2-4)中的 b 代入(2-5)式。

對於低滲漏的系統中我們也可以讓 $Q_i = Q_L = Q_h = 0$ 將 C_{ss} 簡化成：

$$C_{ss} = \frac{\frac{0.01PE_v Q_v C_x}{f} + (G_i + NG_o)}{Q_e + K_d A + NQ_o(1 - 0.01P_o) + \frac{(E_v Q - Q_v)(1 - 0.01P)}{f}} \quad (2-6)$$

即使通風空氣流量 $Q_v = 0$ ，利用低滲透氣體污染物的過濾裝置和較高再循環率可以幫助減少內部污染源的濃度。在商業用途建築結構中，一定會有氣體的滲漏和滲出的情形。實際建築物可能會有許多室內空間，且具有多重來源的氣體污染物與空間與空間之間複雜的空氣交換。

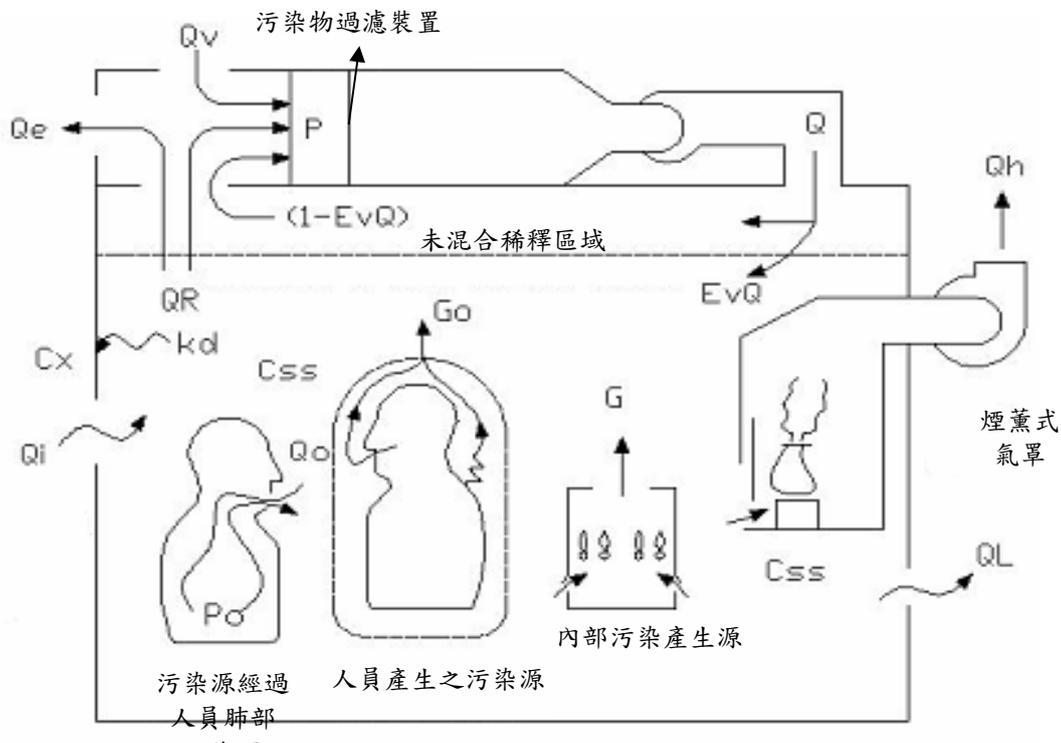


圖 2-1 居室空間之循環式空調通風與氣體污染物產生源示意圖

另外，還包括吸附作用排除建築物內部表面氣體污染物之情形存在。Nazaroff 和 Cass 【5】提供估算污染物沉澱速率 k_d 方程式(2-1)到方程式(2-6)可以推算出沉澱速率在 3 到 $600\mu\text{m/s}$ 的範圍內污染物表面產生之吸附作用。一個最差的例子分析，如果 $k_d=0$ 則室內污染物濃度將會最高。Nazaroff 和 Cass 【5】及 Sparks 【6】利用電腦程式來進行

此部分計算。

2.3 室內空氣品質問題診斷與控制策略

2.3.1 室內空氣品質之問題

在非工業用途的建築物當中之室內空氣品質問題通常是通風換氣量提供不足以致無法稀釋或移除在室內的空氣污染物。除此之外，儘管提供一定外氣通風量，但因為污染物控制方法設計不當或通風空調配置不佳也可能造成室內空氣品質問題。

造成室內空氣品質問題的因素很多，依據美國職業安全衛生協會（National Institute for Occupational Safety and Health；NIOSH）【2】對於建築物室內空氣品質評估調查結果，將引起室內空氣品質問題進行分類，如表 2-4 所示。

表 2-4 NIOSH 調查室內空氣品質問題之型態

問題型態	建築物數量	所佔比例%
通風設計不當	280	53
室內污染物	80	15
室外污染物	53	10
微生物之染物	27	5
建築材料產生之污染物	21	4
未知	68	13
總和	529	100

而在進行氣體污染物的控制設計必須對欲控制之氣體污染物其特性與濃度分布狀況有正確了解。要能正確的掌握氣體污染物的特性或是其濃度等資訊，可以從分析計算污染源之強度或相關數學模式或進行直接量測污染物獲得。不幸地，利用評估計算進行設計的可靠度往往不足，因此設計者常常需要配合觀察、經驗與實際判斷，補充作為設計資料的參考。

一般控制室內空氣品質之通風空調設計有二種情況：

(1)在新的建築物中設計新的通風系統控制室內空氣品質，而室內氣體污染物之負荷必須進行估計或量測。

(2)修正原有通風系統解決特定室內空氣品質問題。

對於第一種情形，必須使用先前描述的數學模式。確定污染物產生的行為、估算並且加入建築物內的產生源，同時確認室外的空氣污染物。

對於第二種情形，可能需要進行實際測量來確認污染物。空氣品質問題的評估可能變成室內空氣品質調查，包括進行建築物檢驗、人員問券調查與局部採樣和分析。一旦瞭解污染物種類特性和其負荷，相關通風空調設計即能開始。

有關污染物負荷之估算部份，針對特定場所或時間進行取樣與分析來確認污染物之濃度。很多的實際量測上在進行污染物與時間的量測分析時會有重疊或是間斷的情形發生，因此通常採用整體污染負荷之估算。

2.3.2 室內空氣品質控制策略

一般用來改善建築物室內空氣品質的四個控制策略有：(1)移除污染物來源(2)使用氣罩進行局部排氣或潔淨循環空氣(3)利用增加整體通風換氣加以稀釋與(4)潔淨整體通風換氣。前三者通常最可行，而利用潔淨整體換氣之控制策略來改善空氣品質通常會很難達成。

1. 來源去除

去除空氣污染物來源對於改善室內空氣品質往往最有效且通常花費最低。例如，在建築物內禁止吸煙或隔離吸煙區在有限的區域內，可以大量降低室內空氣污染。

2. 局部來源控制

當建築物室內空間存在有分散的汙染物產生源或產生數量相當可

觀的氣體污染物時，局部排氣控制比整體通風控制有效。如果這些污染物具有毒性、刺激性、或具有強烈難聞氣味時，必須利用局部通風控制配合室外排氣來加以控制。浴室、廚房是最普遍的例子，排氣量的大小有時候需針對局部排氣相關法規來來設計。最小排氣速度需考量能補集較大的氣膠粒子將其控制並移除，此部分的設計考量與控制氣體污染源有所不同。

局部排氣通常是由排氣風扇透過管路系統與室外排氣塔來把氣體排出室外。相關法規要求有些使用局部控制策略之情況，其排出之氣體必須先進行過濾以防止有毒氣體污染物直接釋放至室外。有時候使用局部控制策略所排出之氣體也可以經過過濾處理後再回到室內空間，如此可以節省對外氣加熱和冷卻所耗費之能源。由於過濾器有故障的風險存在，因此上述情況必須侷限在局部控制策略所排出的氣體污染物是無毒且無害。

3.透過整體通風稀釋

在一般住宅和商業用途大樓裡，主要會在廚房、浴室內和如印表機一樣非連續性產生氣體污染源等之位置使用局部污染源控制策略。沒有局部控制污染源裝置的室內空間，則利用整體通風系統透過稀釋來控制污染物。整體通風系統往往必須提供室內空間熱負荷之需求並符合污染物控制標準。且儘可能達到室內空間空氣完全混合與提供室內每個人員有相同空氣量之目的。

2.4 室內空氣品質數學模式

室內空氣品質的預測，是由污染源、污染物吸附、室內空氣流動及室內與室外間空氣流動等因素所決定。在室內環境中，為了瞭解室內空氣污染物的產生、擴散與衰減，常利用室內空氣品質模型【7】(Indoor Air Quality Models)來預測室內空氣污染物濃度，包括決定論模型(Deterministic Models)、經驗模型(Empirical models)與前兩者的結合。「決定論模型」藉由室內污染物質量平衡原理所推導出來的；而「經驗模型」是將測試資料以多變數迴歸統計的方法決定之。

由於污染物「質量平衡模型」【8】(Mass Balance Model)可提供一般性的應用，藉此來探討污染物濃度與其影響因子間的概略狀況。因此，一個數學模型要描述室內空氣的污染物濃度，必須考慮幾項因素：

- (1)建築物內空調系統之空氣循環。
- (2)循環空氣之污染物濾清效率。
- (3)室內所產生之污染源。
- (4)空調系統之送風將風管內污染物帶入室內。
- (5)建築物室內與戶外之間空氣的流動。
- (6)隨時間變化的污染源及污染物吸附強度。

另外兩個影響室內整體空氣品質的重要因素為"濕度"、"溫度"，尤其是台灣屬於亞熱帶海島型氣候，溫暖而潮濕，許多相關的研究特別強調室內濕度大小對於整個室內生活環境的影響【9】，高的室內濕度會導致在建築體的周圍有凝結水的產生，大大地降低室內生活環境品質，更嚴重的是產生許多因潮濕而造成的疾病。因此，可在空調系統內加裝除濕設備，控制除濕量，使室內生活環境達到舒適及健康的目標。

溫度測量顯示室內系統的熱量平衡或控制問題，而濕度會改變許多室內污染物的釋放量、在空氣中的濃度、以及微生物生長的潛伏性。在質量平衡模型種類包括單室模型 (One-Compartment Model)、多室模型 (Multi-Compartment Model)；而本研究探討案例為室內作業場所，屬於單室模型，故以單室模型作為探討影響因子的基礎，茲將模型原理及方程式推導描述於下。因此為了解決室內空氣品質的問題，我們建立下列之數學模型來描述室內生活環境。

2.4.1 污染物質質量平衡模型

以一個簡單空間的氣流量來建立污染物質質量平衡模型，如圖 2-2 所示，可得污染物質質量平衡系統方程式：

$$\begin{aligned} & (\text{污染物的流入量}) + (\text{污染物產生源的污染物產生量}) - (\text{污染物的流出量}) - (\text{污染物的吸附聚集量}) = (\text{室內污染物的累積量}) \\ (2.7) \end{aligned}$$

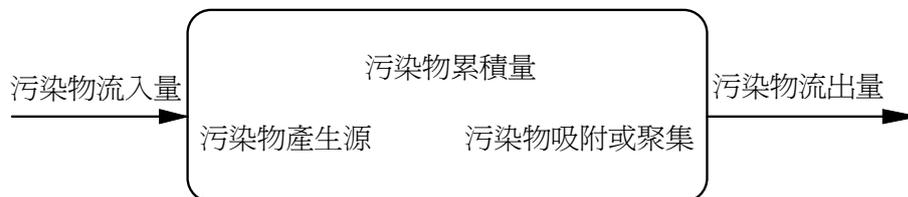


圖 2-2 污染物質質量平衡模型

(2.7)式之系統方程式受到的假設限制為不可壓縮流，意即進入屋內的空氣質量流率等於流出屋外的空氣質量流率。雖然已有(2.7)式的系統方程組，然而因為空氣與污染物的混合型式相當複雜，所以在利用(2.7)式的系統方程組建立模型前，必須先行定義及簡化污染物與室內空氣的混合方式，其混合的方式有兩種型式的混合模型：

1. Plug - flow mixing model :

此模型為污染物濃度沿著空氣氣流的路徑，以點到點(point to point)的分佈方式有不同的濃度變化。

2. Well - mixed model :

此模型假設為污染物均勻地分佈在房間內的每個角落。由過去的實驗資料得知，污染物的濃度分佈並不是以點對點沿著氣流路徑的方式分佈，特別是運用電腦建立模型時，所採用的時間區間是以數分鐘為一間隔，因此無法得知濃度沿著氣流路徑分佈的大小，故我們採用 Well-mixed Model 來建立室內空氣品質模型。

2.4.2 空氣污染物模型

空氣污染物模型是利用空間中的污染源，污染物吸附，循環的空氣流和不同的污染流，流入及流出的質量平衡方法來預測室內二氧化碳的累積，整個系統忽略污染物集中的梯度，因此任何時刻系統內的污染物濃度可視為均勻分佈(Well - mixed Model)。

如圖 2-3 所示，以一個體積 V 的單一空間為例，戶外的補給空氣經過一個效率 F_0 的空氣濾清器，以氣流量 q_0 流入房間，同時室內循環空氣經過一個效率 F_1 的空氣過濾器，以氣流量 q_1 於室內循環，有空氣經由隙縫滲入及滲漏出房間，其流量分別為 q_2 、 q_3 ，排出之氣流量為 q_4 ，戶外及室內二氧化碳於時間 t 時，濃度分別為 C_0 、 C_i ，屋內的污染源及污染物吸附量分別為 S 和 R ，混合因子為 k ，因此可得氣流質量平衡方程式和空氣污染物質量平衡方程式。

空氣質量平衡方程式：

$$q_0 + q_2 = q_3 + q_4 \quad (2.8)$$

式中：

q_0, q_2, q_3, q_4 為氣流量

空氣污染物質量平衡方程式：

$$V \frac{dC_i}{dt} = kq_0C_0(1-F_0) + kq_1C_i(1-F_1) + kq_2C_0 - k(q_0 + q_1 + q_2)C_i + S - R \quad (2.9)$$

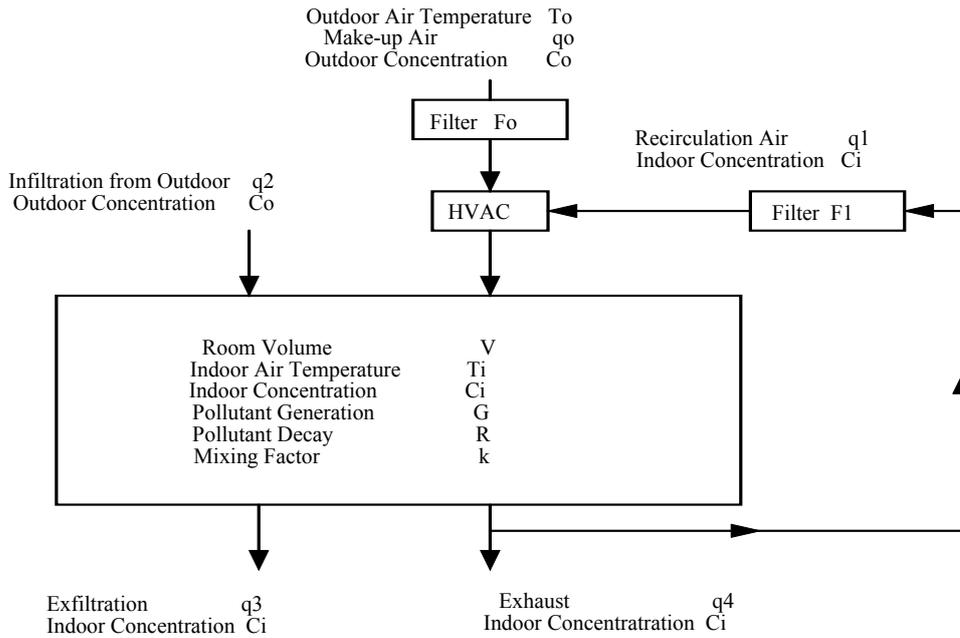


圖 2-3 空氣污染物濃度模型

2.4.3 濕度模型

當在分析建築物內濕度的變化狀況時，首先可以從空氣中水份質量的增加及減少方向著手。空間中濕度的動態平衡會隨著建築物內空氣的流動量而改變，任何時刻相對濕度會受建築物內空氣流動的影響【10】【11】。因此在分析濕度時，我們必須考慮到下列四種影響濕度變化的參數：

- (1) 空調機組供給之通風量，及因建築物氣密性不良所造成的空氣滲入量(此兩者皆與室內外空氣的濕度含量差有關)。
- (2) 建築物內由浴室、廚房或增濕機等所產生的濕氣。
- (3) 空氣中的水氣凝結及消散造成濕度降低。
- (4) 空氣中有吸濕性材料，造成水氣之吸附與釋放。

經由上列四種影響濕度變化的參數，我們可由單一空間為例，如圖 2-4 所示，假設空間之邊界為控制表面，可以推導出一個質量平衡方程式：

質量平衡方程式：

$$V \frac{dM_i}{dt} = M_0(q_2 + q_0) - M_i(q_3 + q_4) + G - C - A - D \quad (2.10)$$

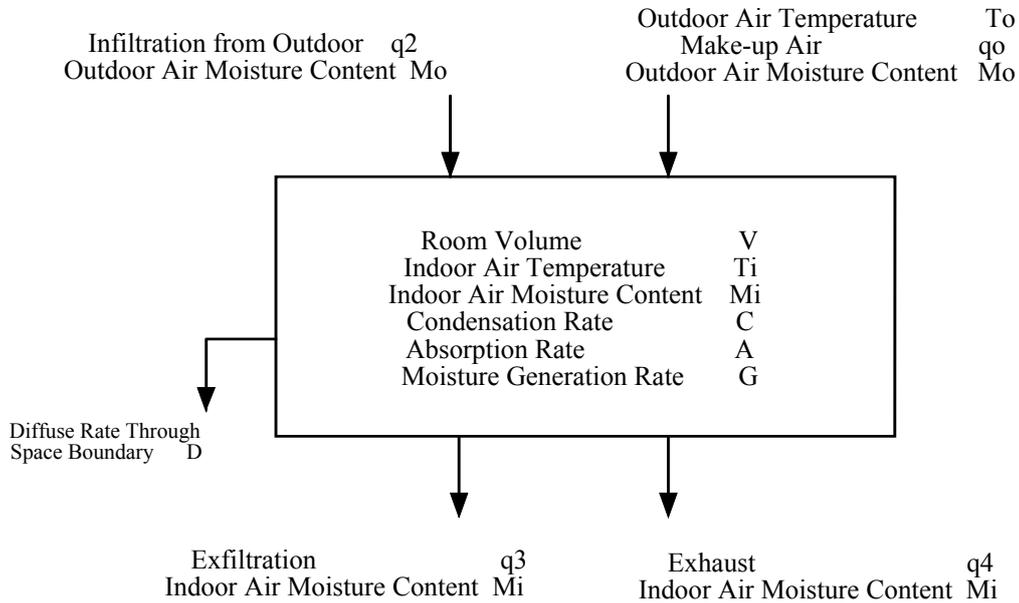


圖 2-4 濕度模型

2.4.4 包括室內空氣污染及濕度效應的模型

如圖 2-5 所示，模型中包括了室內空氣污染及濕度的效應，由式(2.9)得知二氧化碳濃度 C_i 隨時間而變化，保持其它變因為常數，且當 $t=0$ 時， $C_i=C_s$ 可得：

$$C_i = \frac{k[q_0(1 - F_0) + q_2]C_0 + S - R}{k(q_0 + q_1F_1) + q_2} \cdot [1 - e^{\frac{-k \cdot (q_0 + q_1F_1 + q_2) \cdot t}{V}}] + C_s \cdot e^{\frac{-k \cdot (q_0 + q_1F_1 + q_2) \cdot t}{V}} \quad (2.11)$$

上式中 $R=EC_i$ ，互為一比例常數。

然而若要簡化方程式(2.10)則必須利用適當的分析關係，將水氣凝結造成之濕度減少率、吸濕性材料造成之濕度減少率、經由空間之邊界散發速率等，假設上述變數對空間中空氣濕度成份呈現出線性多項式的特性，簡化分析上的困難。當 $t=0$ 時， $M_i=M_s$ 可得：

$$M_i = \frac{M_0(q_0 + q_2) + G - C - A - D}{q_3 + q_4} \cdot [1 - e^{\frac{-(q_3 + q_4)t}{V}}] + M_s \cdot e^{\frac{-(q_3 + q_4)t}{V}} \quad (2.12)$$

利用式(2.11)及式(2.12)，我們可以得到二氧化碳的濃度及室內的濕度，進而可以調節通風量及除濕量，使室內環境達到舒適的區域。

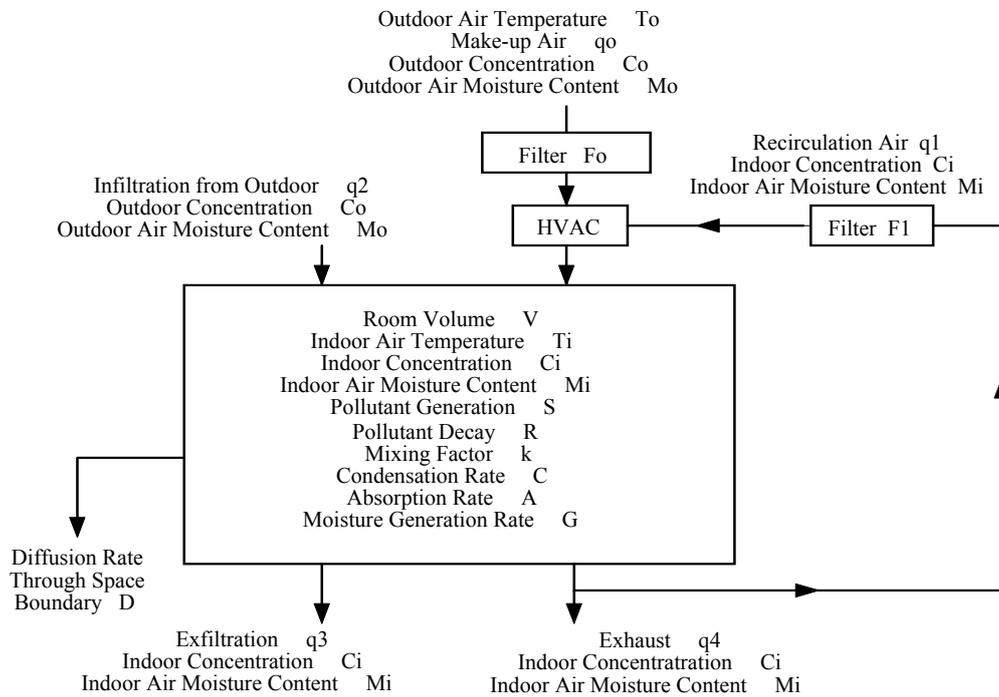


圖 2-5 室內空氣污染物濃度及濕度效應模型

為了達到簡易估算必要通風量或預測室內空氣污染物濃度，將上述模型予以簡化。而簡化的預先假設條件如下：

1. 污染物發生量為一常數(Constant)--->> 污染物衰減量 $R = 0$
2. 污染源限於設定
3. 污染物只被機械通風(Machined Ventilation)移除--->> $q_2 = q_3 = 0$

藉由上述假設，室內污染物濃度與時間的關係如(式2.13)所示：

$$C_i = C_o + \frac{S}{kq_0} [1 - \exp(-\frac{kq_0}{V} t)] \quad (2.13)$$

當室內達到穩態(steady-state)時(即 $t \rightarrow \infty$ 時)， C_i 為室內濃度最大值(Peak Value) $C_{i,ss}$ 。

$$C_{i,ss} = C_o + \frac{S}{kq_0} \quad (2.14)$$

1973 年，ASHRAE 訂定每人所需的最小通風量值為

5cfm(ft³/min)，便是假設一個人新陳代謝CO₂的產生率為0.0105cfm，室外CO₂濃度(CO)為0.0003(300ppm)，室內CO₂濃度健康容許值0.25%(2500ppm)，並假設室內完全混合($k=1.0$)，利用此簡化的空氣污染物質量平衡模型(2.14)所估算出來的【12】。

依據污染物質量平衡模型的結構形式(2.14)，將影響因子分成三類，分述如下：

1. 污染物相關變數: 考量污染源的特性，包括強度、密度與流動性。
2. 換氣量相關變數: 考量新鮮外氣引入的可能，包含空調引入與建築物外殼洩漏。
3. 換氣效率相關變數: 考量建築空間因素對換氣效率的影響，包含空間型態、室內家具配置與空調送回風口型態等。

上述相關變數詳細說明如後。

2.4.5 空氣污染物及濾網的設計方程式

在這邊提供了一個方法，以確使在所有時間內污染物的濃度均在可容許範圍內，特別強調空調清淨和過濾的重要，並提供一個評估HVAC系統運作的方法。建築物內室內空氣品質IAQ的影響因素主要是(1)室內污染源的排放(2)用作稀釋用途的新鮮外氣之品質(3)稀釋速率(4)系統。而其中，室內污染源的污染排放是首先應被注意到的IAQ決定因子。這包含了室內物質，消費者產品，傢俱裝潢、燃燒器具和製程、生物滋長、居住人員等。

現在的ASHRAE標準62-1999，除了有換氣率程序(Ventilation Rate procedure；VR Procedure)之外，尚有另一IAQ程序可供為選擇方案。IAQ程序主要是提供作為淨化過的(cleaned)和再循環的(recirculated)空氣用於空調系統和計算，可用於定風量CAV系統和變風量VAV系統，而外氣引進可以是定量引進或者是比例引進者，所以，適用總共包括

七種不同類型的系統，都是廣被使用的 HVAC 系統，收列在標準中。如表 2-5，係用來作為聯結 IAQ 程序以在一空間內之空內污染物濃度計算關係式，並可以此計算結果與 VR 程序的適當外氣換氣量值相驗證，並發覺其適用性。然而，在部份負載時，表 2-5 的關係並未提供足夠之資訊可供計算分析之用途，尤其是無法用來預測污染物濃度變化的全天性之變化情形。

表 2-5 七種常用的空調系統及污染物濃度方程式

Contaminant concentration as a function of time for HVAC system Classes I through VII.					
HVAC system class	Filter location	Flow	Temperature	Outside air	Space contaminant concentration
I	None	VAV	Constant	100 percent	$Cs(t) - Cs(t-1) + [Cs(t-1) - C_0] \exp(-vot/Q) + N/Vo [1 - \exp(-Vot/Q)]$
II	A	Constant	Variable	Constant	$Cs(t) - Cs(t-1)e^{-x} + [(CoVo + N)/(Vo + Ef(Vs - Vo))](1 - e^{-x})$
III	A	VAV	Constant	Constant	$Cs(t) - Cs(t-1)e^{-z} + [(CoVo + N)/Vo + Et(FrVs - Vo)](1 - e^{-y})$
V	B	Constant	Variable	Constant	$Cs(t) - Cs(t-1)e^{-x} + [(1 - E)CoVo + N]/[Vo + Ef(Vs - Vo)](1 - e^{-x})$
VI	B	VAV	Constant	Constant	$Cs(t) - [Cs(t-1)e^{-y} + (1 - Ef)CoVo + N]/[Vo + Ef(FrVs - Vo)](1 - e^{-z})$
VII	B	VAV	Constant	Proportional	$Cs(t) - [Cs(t-1)e^{-z} + (1 - Et)FrCoVo + N]/[FrVo + EtFr(Vs - Vo)](1 - e^{-z})$

Note: Exponents x, y, and z above are computed as follows:
 $x = t/Q[Vo + Et(Vs - Vo)]$ $y = t/Q[Vo + Et(FrVs - Vo)]$ $z = tFr/Q[Vo + Et(Vs - Vo)]$

在此假設濾網 A 及 B 的位置分別以微分形式表示 dt 時段之污染物濃度，可分別得到以下兩個式子：

A 位置：

$$0dCs(t) = Ndt + CoVodt - Cs(t)Vodt - Cs(t)(Vs - Vo)Efdt - Cs(t)Vadt \quad (2.15)$$

B 位置：

$$0dCs(t) = Ndt + (1 + Ef)CoVodt - Cs(t)Vodt - Cs(t)(Vs - Vo)Efdt - Cs(t)Vadt \quad (2.16)$$

其中

Cs(t) = 時間 dt 的污染物濃度

Q = 空間體積

N = 污染物產生速率

C_0 = 外氣之污染物濃度

V_0 = 換氣之流率

V_s = 供風之流率

V_a = 吸收空氣(adsorbed air)之流率

E_f = 濾網效率

解以上(2.15)，(2.16)方程式，則可得到欲求的污染物濃度 $C_s(t)$ 分別是：

濾網 A 位置

$$C(t) = C(t-1)e^{\left\{-\frac{[V_0+V_a+E_f(V_s-V_0)]t}{Q}\right\}} + \left\{\frac{(C_0V_0+N)}{[V_0+V_a+E_f(V_s-V_0)]}\right\} \times \left\{1 - e^{\left\{-\frac{[V_0+V_a+E_f(V_s-V_0)]t}{Q}\right\}}\right\} \quad (2.17)$$

濾網 B 位置

$$C(t) = C(t-1)e^{\left\{-\frac{[V_0+V_a+E_f(V_s-V_0)]t}{Q}\right\}} + \left\{\frac{((1-E_f)C_0V_0+N)}{[V_0+V_a+E_f(V_s-V_0)]}\right\} \times \left\{1 - e^{\left\{-\frac{[V_0+V_a+E_f(V_s-V_0)]t}{Q}\right\}}\right\} \quad (2.18)$$

其中 $C_s(t-1)$ = 空間中污染物濃度之(前一個)初值

這對室內空氣品質的控制，提供很好的數學方法，及預測性。

2.5 通風換氣與換氣率理論

2.5.1 通風換氣理論

換氣是降低室內空氣污染物濃度的最重要的手法，換氣量的多寡與室內空氣污染物濃度有絕對關係，如圖 2-6 所示 CO_2 濃度與換氣量成反比。不同換氣量對室內污染物之排除影響甚鉅，建築物應有適切的通風換氣，以排除室內之空氣污染物，降低其濃度以維護室內人員的健康與工作效率。通風換氣除排除更新室內污濁之空氣外，尚有改變空氣之溫濕度與風流動的生物效應的功能。

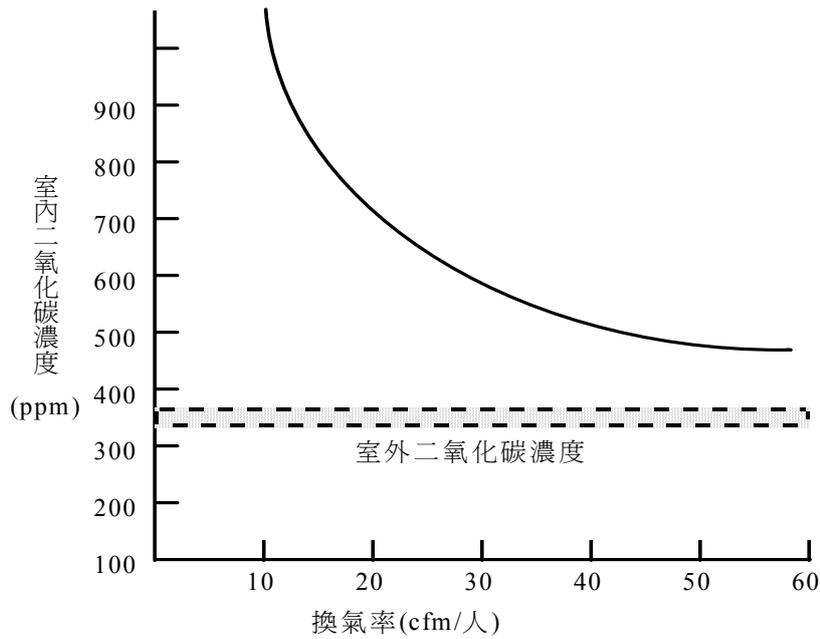


圖 2-6 室內二氧化碳與換氣率的關係

通風換氣的方式依其目地可分成兩種：

1. 一般通風換氣

主要是指以舒適為目地而進行室內換氣作用，通常多和空氣調節一併考慮，以同時達到控制室內溫度、相對濕度、清潔度之要求。

2. 稀釋通風換氣

主要是指以大量未受污染或低污染之空氣來稀釋室內有污染之空氣，以達到衛生控制或危害物控制之要求。

這兩種通風方式之主要差異乃在其換氣與送風方式之不同，一般空調通風系統大多是以達到舒適之目地為主，較少考慮污染物之排除作用，因此在功能設計時仍有相當大比例之室內空氣循環迴流，藉以減少能源的消耗，而僅有少部份空氣是與室外空氣互換。

2.5.2 換氣率理論模式

應用一示蹤氣體在一大氣壓下釋放並將之均勻混合於一密閉空間內，則在任一瞬間此氣體的濃度可由式(2.19)的連續方程式加以決定：

$$V \frac{dC}{dt} + QC = G \quad (2.19)$$

其中

V ：密閉空間有效體積

C ：示蹤氣體瞬間濃度

Q ：空氣流量

G ：示蹤氣體釋放率

t ：時間

有許多測試機制可對 Q 加以評估，主要分為(1)濃度衰減法 (concentration decay)、(2)定量濃度法(constant concentration)、(3)定量釋放法(constant emission)。而本研究採用示蹤氣體濃度衰減法評估室內空間之換氣率。

考慮一定量的示蹤氣體均勻分佈於一空間內，其濃度將達到一尖峰值(peak level) $C(0)$ ，而當示蹤氣體被進入之外氣所稀釋時，示蹤氣體的濃度將逐漸地衰減；當氣體均勻分佈後，氣體釋放率 G 變為零，則式(2.20)連續方程式中的末項將消失，在將前兩項加以積分，可得以下的式子。

$$C(t) = C(0)e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (2.20)$$

其中

$C(0)$ 示蹤氣體初始濃度

$C(t)$ 示蹤氣體在時間 t 時的濃度

而換氣率(Q/V)，可由示蹤氣體隨時間之濃度衰減曲線取對數的斜率加以求得。

2.6 空氣年齡理論

空氣年齡 (Age of air) 乃指流入室內空間的空氣經由開口部流出所需要的時間，由於室內空氣沈積於室內空間中的時間過長將導致其對人體健康有不良之影響，如何將存在於室內的空氣有效的以通風系

統所供應的新鮮空氣予以取代，對於室內空氣品質 (Indoor Air Quality) 的掌握有其重要性，亦即需要對於空氣交換效率 (Air exchange efficiency) 的成效研擬有效的評估模式。

基本上，室內之空氣年齡可分為室內平均空氣年齡 (Room mean age of air) 與局部平均空氣年齡 (Local mean age of air) 兩種。室內平均空氣年齡是求取室內所有格點的空氣年齡平均值，以評估該空間通風換氣效率與換氣量之狀況。而對於室內空間中某一特定區域之評估則引用“局部平均空氣年齡”之評估模式，其定義為空氣由室內空間入口處飄移至待評估區域任一量測點 P 所需之平均時間，主要應用於個別作業場所之通風或是自然通風建築物空氣分布之評估上。

以只有一個進氣口與排氣口的機械式通風空間而言，引入的空氣分子經由不同路徑的飄移至 P 點的數量會隨時間改變，如圖 2-7 所示，而圖中所謂的駐留時間為空氣離開此一空間的年齡。當時間 $t=0$ 時，由進氣口進入室內空間中 P 點的空氣分佈機率如圖 2-8 所示，其在時間 t 與 $t+\delta t$ 之間到達 P 點的分子數為長條陰影之面積，如式(2.21)所示。

$$\text{長條陰影之面積} = A_p(t) \cdot \delta t \quad (2-21)$$

到達 P 點之總分子數為機率分佈曲線下的面積，如式(2-22)所示。

$$\text{機率分佈曲線下的面積} = \int_0^{\infty} A_p(t) dt \quad (2.22)$$

假如機率分佈以達到 P 點總分子數的型態來表示的話，則到達 P 點的總分子數會等於 1 或 100%，也就是：

$$\text{機率分佈曲線下的面積} = \int_0^{\infty} A_p(t) dt = 1 \quad (2-23)$$

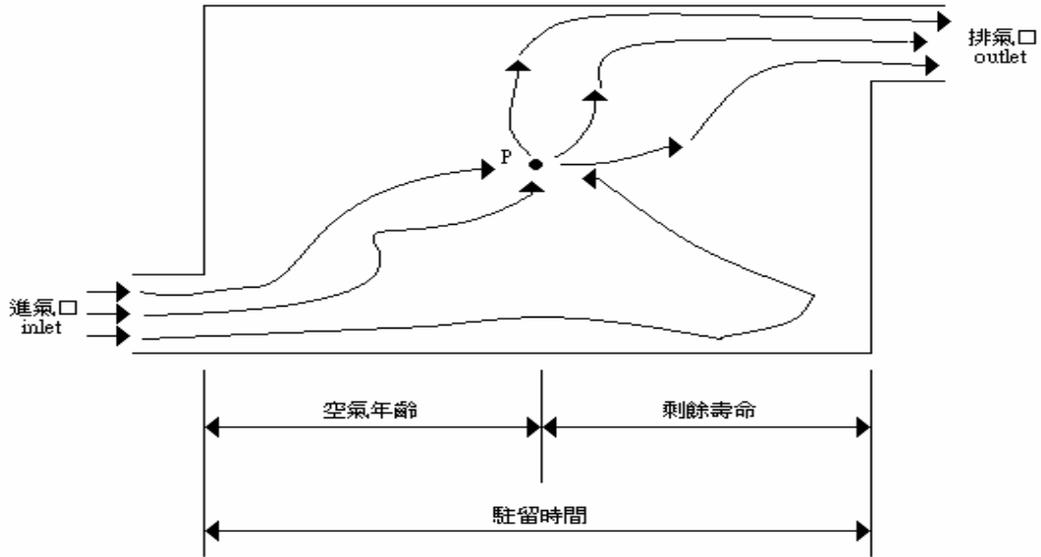


圖 2-7 機械式通風模式之空氣年齡與駐留時間的關係

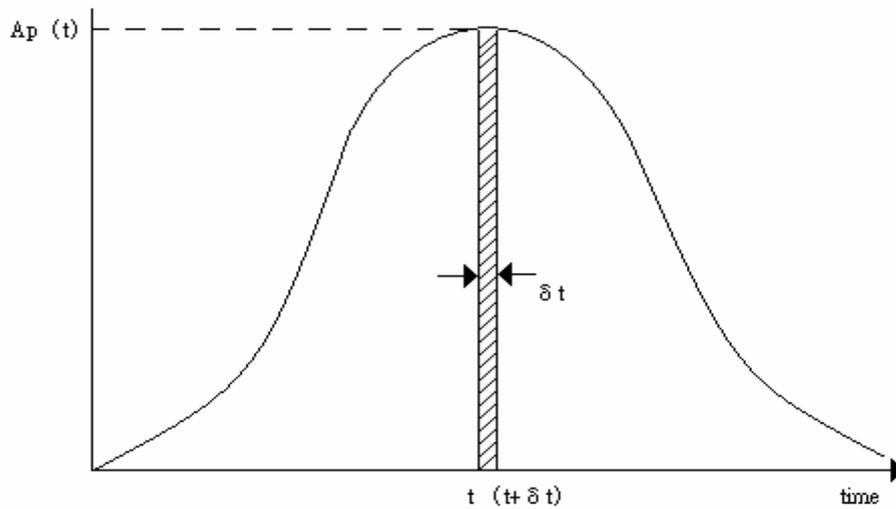


圖 2-8 空氣進入室內空間中 P 點得機率分佈曲線圖

1. 局部平均空氣年齡 (Local mean age of air)

局部平均空氣年齡的基本定義為「空氣由入口處飄移至空間中的任一點 P 所需的平均時間」。位於 P 點的局部平均空氣年齡 τ_p 可由圖 2-8 機率分佈曲線的中心線對垂直軸加以積分而求得：

$$\tau_p = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot A_p(t) dt}{\int_0^{\infty} A_p(t) dt} \quad (2.24)$$

2. 室內平均空氣年齡 (Room mean age of air)

室內平均空氣年齡定義為「室內所有點的局部平均空氣年齡之平均值」。而本文應用的是濃度衰減法，故可以將是內平均空氣齡 $\langle \tau \rangle$ 以示蹤氣體的室內平均濃度加以表示：

$$\langle \tau \rangle = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot A_p(t) dt}{\int_0^{\infty} C_0} \quad (2.25)$$

2.7 空氣交換效率與換氣效率

2.7.1 空氣交換效率

依研究報告【13】指出，前面所述之平均空氣年齡與象徵時間常數 τ_N 可用來定義空氣交換效率（Air exchange efficiency）與通風效率（Ventilation efficiency），而通風效率也代表污染物移除效率，其數學關係如式（2-26）至式（2-11）所示。

1. 空氣交換效率（Air exchange efficiency）

$$\langle \varepsilon_a \rangle = \frac{\tau_N}{2 \cdot \langle \tau \rangle} \times 100\% \quad (2.26)$$

2. 局部空氣交換效率（Local air exchange efficiency）

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_N}{2 \cdot \tau_p} \times 100\% \quad (2.27)$$

式中的 τ_N 的值相當於室內空間體積除以進氣量，也就是換氣率的倒數，其單位通常是小時。

空氣交換效率可以表示室內氣流型態性質，如短路（Short-circuiting）或完全置換（Perfect displacement）氣流型態。根據其研究指出，若為完全混合（Complete mixing）氣流型態則 $\langle \varepsilon_a \rangle$ 與 ε_a 的數值皆為 0.5；若數值小於 0.5 則為短路氣流型態；若數值大於 0.5 則為置換式氣流型態；而若為活塞式（Piston flow）氣流型態則空氣交換率最大可達 1，且對於局部空氣交換效率其數值並沒有上限。

2.7.2 通風效率

室內整體通風效率(Ventilation efficiency)，可由進排氣口處與室內污染物平均濃度差異求出，其數學關係式如式(2.28)所示；而室內局部通風效率(Local ventilation efficiency)則由進排氣口處與室內某量測點的濃度值計算出，其數學關係式如式(2.29)所示。整體通風效率表示室內整體污染物移除效率；而局部通風效率表示室內某點污染物移除效率，以上兩者之值愈大代表通風情況較佳。

1. 室內整體通風效率

$$\varepsilon = \frac{C_e - C_s}{\langle C \rangle - C_s} \times 100\% \quad (2.28)$$

2. 室內局部通風效率

$$\varepsilon_p = \frac{C_e - C_s}{C_p - C_s} \times 100\% \quad (2.29)$$

其中：

ε ：室內整體通風效率

ε_p ：室內局部通風效率

C_s ：進氣口污染物穩態濃度

C_e ：排氣口污染物穩態濃度

$\langle C \rangle$ ：室內污染物平均穩態濃度

C_p ：室內某量測點污染物穩態濃度

第三章 建築物進氣與排氣對外開口設計策略

建築物利用空調通風系統引進室外空氣至室內進行空氣交換，使空間內部污染物經由新鮮外氣加以稀釋，可以得到較好的室內空氣品質。然而空調通風系統所引進之外氣若已遭到污染，透過室內外空氣進行交換非但無法稀釋移除室內污染物，反而會將室外污染物蓄積在空間內，無法達到污染物稀釋移除、控制室內空氣品質之目的。

因此空調通風系統之對外進氣與排氣口之配置相對重要。外氣進氣口位置引進之室外空氣若是容易受到污染物影響，無論是位於室外之污染物產生源附近，亦或是靠近建築物之通風排氣口或因外風場影響將排出之氣體污染物又再次帶進室內，都將造成室內空氣品質的影響。

建築物空調通風之進氣與排氣對外開口之設計除應考量提供適當之通風換氣量外，仍須考量引進外氣之品質、排氣口設計是否會形成二次污染及受外風場風力與風壓的影響等。

3.1 地表風速特性

一般而言，地表附近的風速會隨高度的增加而遞減，其風速的垂直分布與地表上的地物、地況有關。如圖 3-1 所示，都會地區高樓林立，對氣流而言，阻礙空氣流動的地表粗糙度較大，而邊界層厚度亦較大。而平坦的沿海地區，地表粗糙度較小，邊界層厚度亦較小。工程上常用指數率或對數率來描述風速之垂直風佈。

$$\frac{V_h}{V_g} = \left(\frac{h}{h_g}\right)^\alpha \quad (3.1)$$

V_h = 高度下的平均風速

V_g = 梯度風速(邊界層外的風速)

h = 梯度高度(邊界層厚度)

h_g = 梯度高度

α = 指數

梯度風速會因氣象狀況隨時在變，但梯度高度與指數則視地況而定，地況則可依建築物所再位置的地表特性分為四類，如表 3-1 所示：

表 3-1 地況分類與指數 α 值之關係【14】

地況分類	地況特性	梯度高度 h_g m (ft)	指數 α
地況 A	海岸、冰原、沙漠	250(820)	0.11
地況 B	開闊之平原	300(984)	0.15
地況 C	郊區、鄉村	400(1312)	0.25
地況 D	大城市之市中心	500(1640)	0.36

(1)地況 A：

平坦無障礙物之海岸地區或湖岸地區，風系由水平面方向吹過來，距海岸線 500 公尺或建築物高度 10 倍的範圍(兩者取較大值)係屬此種條件下，方式用此種地況。

(2)地況 B：

市郊、鄉村或有許多高度介於 10~20 公尺建築物散步其間的地區，建築物的迎風面的前方至少有 500 公尺或建築物高度 10 倍的範圍(兩者取較大值)係屬此種條件下，方可使用地況 B。

(3)地況 C：

地勢平坦開闊之地面、草原或地面散佈的障礙物高度皆小於 10 公尺的地區。

(4)地況 D：

大城市之市中心區，至少有 50%的建築物高度大於 20 公尺者，建築物的迎風面的前方至少有 800 公尺或建築物高度 10 倍的範圍(兩者取

較大值) 係屬此種條件下，方可使用地況 D。

由圖 3-1 可看出地況越粗操，指數和梯度高度越大。

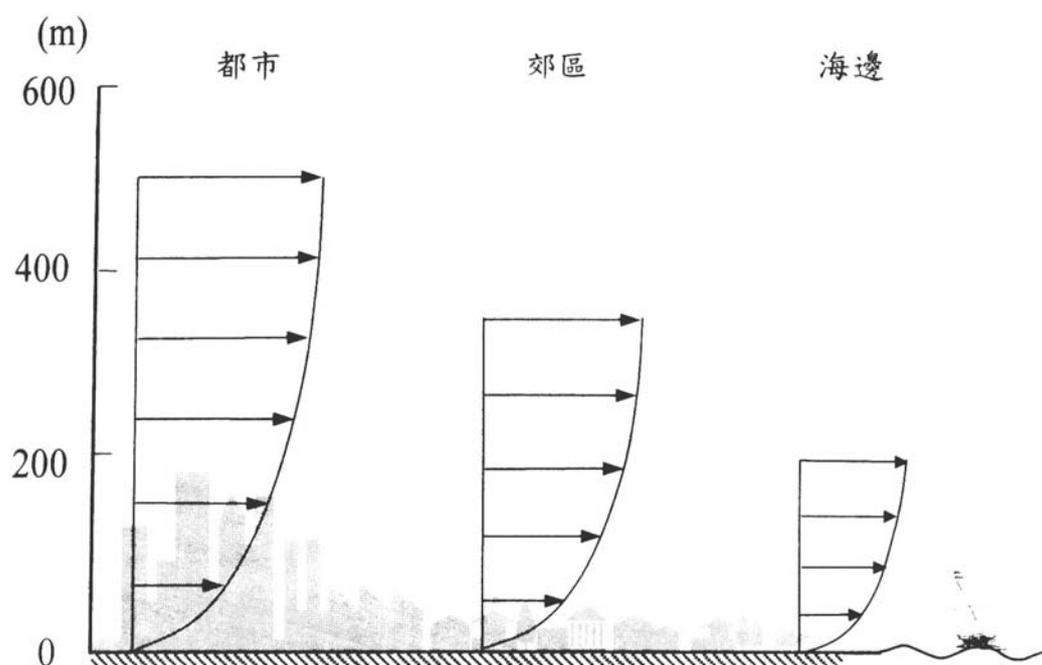


圖 3-1 不同地況之風速分布【14】

3.2 建築物所受的風力

從建築結構設計的觀點來看，作用於建築物上的風力可分為順風向、橫風向與扭轉向風力。順風向風力主要由風場中的陣風造成，對於基本造型近似矩形柱體的建築物，大體上可以透過理論與實驗數據得到合理的評估。

在建築設計上，重要的橫風向擾動風力主要來自流體通過建築物時，發生的流體分離 (separation) 與渦散現象 (vortex shedding) 所造成的週期性作用力。當建築物的高寬比與柔度都很大時，在設計風速之內可能會發生結構共振現象，造成過大的振動反應。這個渦散分離現象引發的結構共振，與建築物的幾何造型及結構動力特性有密切關係，目前並無妥善的分析模式可供解析。

對於一般幾何造型的建築物，扭轉向風力的影響小於順風向及橫風向風力。由於扭轉向風力也是源自流體分離，故亦無分析模式。所幸，橫風向與扭轉向風力對一般高層建築的影響有限，主要的設計風力仍由順風向風力控制。

當風流經建築物時，會依建築物的幾何外型，產生下列幾種風場：

1.迎風面渦流(upstream vortex)：

當風遇到建築物時，部分氣流會由建築物上方與兩側加速繞過去，部分氣流沿建築物的迎風面向下切，在建築物的前方形成渦流。建築物的迎風面越寬越大，下切氣流越強。如圖 3-2 所示

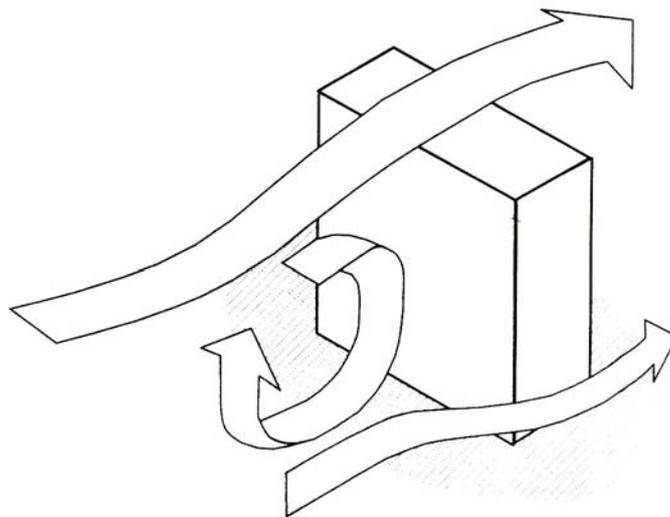


圖 3-2 下切氣流之示意圖【15】

2.建築物尾流(building wake)：

當風遇到建築物時，會在建築物的背風面形成一流場紊流的尾流區，因尾流區之壓力低於大氣壓力，固越過建築物上方的氣流會受到背風面之負壓力的吸引，向下及向建築物後方流動，形成一個氣流迴旋的流場。其尾流區的流場特性會受到建築物的幾何外型、風向角和周遭建築物的影響。如圖 3-3 所示

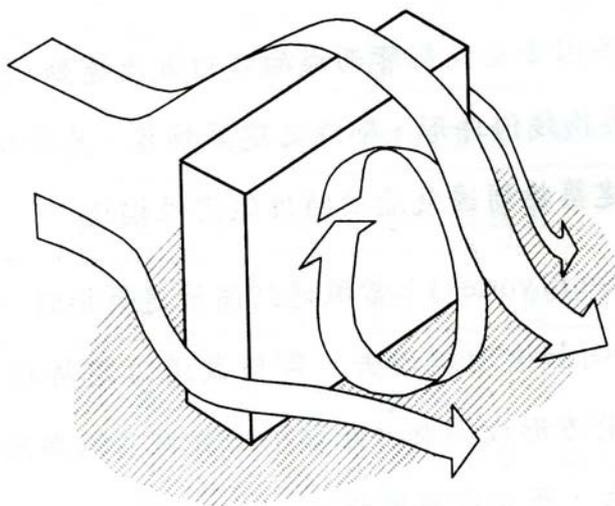


圖 3-3 建築物尾流之示意圖【15】

3 穿堂風(through flow)：

建築物迎風面與背風面之間有氣壓差，以致當有前後貫通的通道開口打開時，大樓內的通道會形成氣流的快速流動，此現象稱之穿堂風，會對進出大樓及經過出入口的行人構成不舒適的情形如圖 3-4 所示。

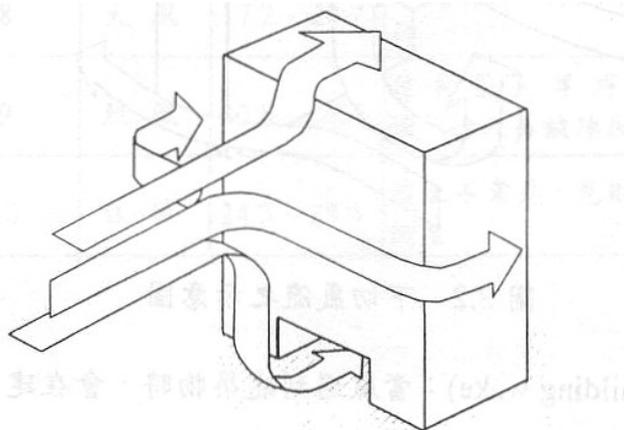


圖 3-4 穿堂風示意圖【15】

4 角隅強風(corner flow)：

當氣流要由建築物兩側繞過去時，流體會有加速的現象。同時在角隅處，會產生渦流分流現象，造成建築物角隅兩設有較強的風速。建築物角隅的細部設計與幾何形狀會影響到此處的風場。譬如說矩形的建築物，渦流會發生在角隅處；但圓弧形的建築物，渦流分離點則

與表面粗糙度有關。如圖 3-5 及圖 3-6 所示

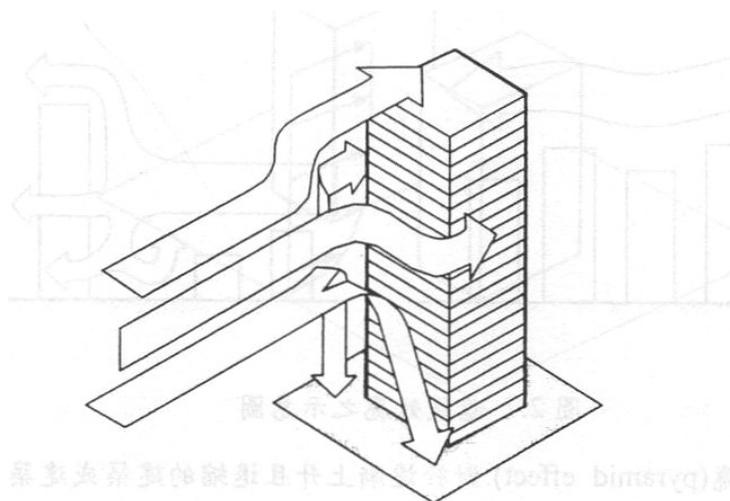


圖 3-5 建築物角隅強風示意圖【15】

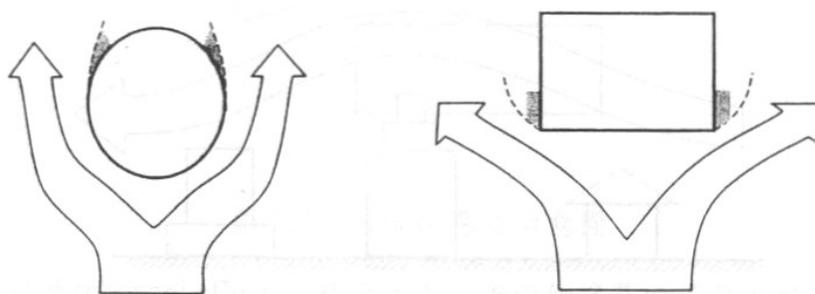


圖 3-6 角隅渦流發生處【15】

5 遮蔽效應(shelter effect)：

近似高度與規模的建築物群比鄰而立時，對於迎面而來的氣流產生阻牆的遮蔽作用，迫使氣流由建築群的上方越過及側邊繞過。反之，若高層建築物的前方為低矮建築物時，則兩建築物之間會有極強的渦流發生。如圖 3-7 所示

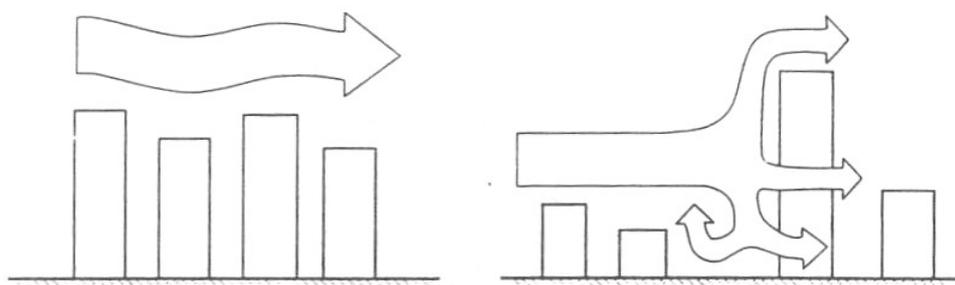


圖 3-7 遮蔽效應之示意圖【15】

6 金字塔效應(pyramid effect)：

對於逐漸上升且退縮的建築或建築群，建築物頂部分離剪力層受到漸次升高的邊界影響，匯聚成一股向上湧生的氣流。在金字塔效應的影響下，下切氣流與角隅強風會較弱。如圖 3-8 所示

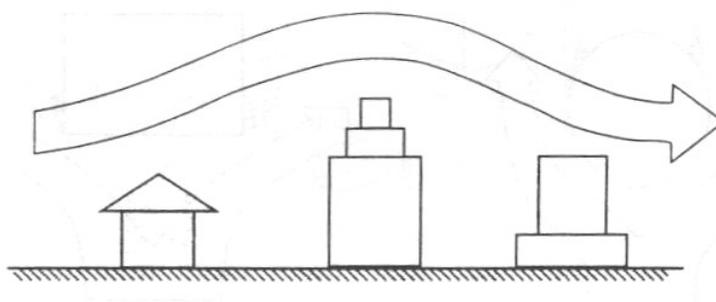


圖 3-8 金字塔效應示意圖【15】

7 縮流效應(venture effect)：

當風由一寬廣之區域吹進狹窄的街道時，由於流通斷面積減小，氣流會有加速的現象，形成高風速區出現。氣流加速的現象會隨著建築物之間距離的增大而明顯減低。如圖 3-9 所示

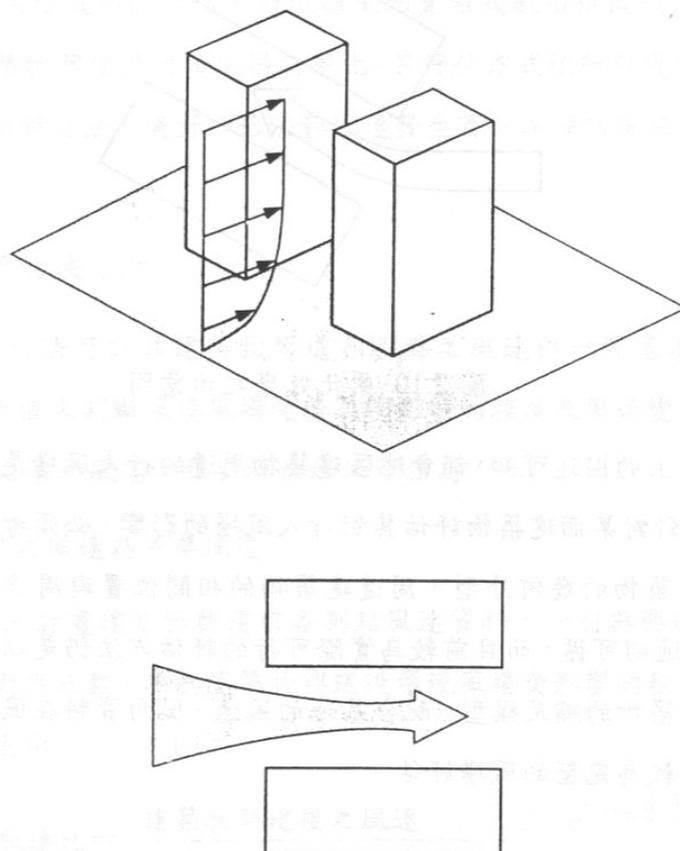


圖 3-9 縮流效應示意圖【15】

8 渠化效應(channel effect)：

都會區中沿街兩側建築物多具有較平整的立面且相互庇鄰，對於運行期間的氣流而言，猶如渠道之兩壁，一般稱為街谷，此現象會驅使接近地面的氣流脫離原來的風向而沿街谷的走向流動。如圖 3-10 所示

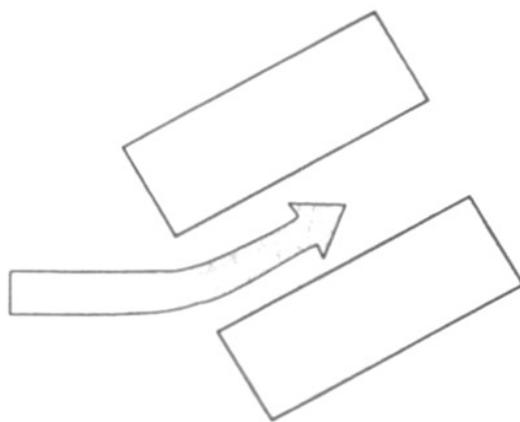


圖 3-10 渠化效應示意圖【15】

3.3 建築物的風壓判定

建築物所受之風壓會影響其空調外氣進氣口與排氣口之性能，例如當正向風壓朝向排氣口時，排氣效果會受影響而降低。因此建築物規劃設計空調通風系統其對外進排氣口時須考量風場與附近建築物群間所形成之風壓狀況。

雖然近年來計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 進步很快，對於航太、汽車、機電方面的應用都有極大貢獻，然而，應用於高層建築物的複雜風力作用尚須一段時日。所以風場在建築物上所造成的風壓唯有藉助物理縮尺模擬即風洞實驗來預估實際的風力現象。

執行風洞試驗時，需妥善考慮縮尺模型與實際建築物之間的模擬

相似率，唯有如此，風洞縮尺實驗結果才能確實應用於原型結構。設計高層建築的風洞試驗，需滿足流場以及結構空氣動力（或結構空氣彈力）的模擬相似性。建築風工程探討的是建築物在強風作用下的結構反應；以風洞進行縮尺模擬時，需要正確模擬以下現象：

1. 自然風場特性
2. 高樓幾何特性
3. 正確的長度縮尺、時間縮尺與速度縮尺
4. 正確的高樓空氣動力效應
5. 對於少數超高層建築，需正確模擬建築結構的空氣彈力相似性

風洞實驗後的結果數據，與全尺寸實驗的數據是相似的。由於全尺寸實驗並不能在建築物完成前做量測，除非有相似的建築物和鄰近地況，而風洞提供了一個在縮尺模型中預測各種風力的影響，量測的數據與在建築物完成後所做的全尺寸實驗數據，在不同風向上，其平均壓力係數的分佈，大致上是相似的。

3.4 風壓係數

建築物上的風壓，在風洞或全尺寸中，都可用速度 (velocity head) 去區別量測數值以獲得符合在高層建築的風速下之無因次參數。

因此可得下列公式：

$$P_w - P_{ref} = C_w \rho_a v_w^2 / 2 \quad (3.2)$$

$$\Rightarrow C_w = 2(P_w - P_{ref}) / \rho_a v_w^2 \quad (3.3)$$

P_{ref} = 參考壓力，通常為一大氣壓

ρ = 空氣密度， kg/m^3 (lb/ft^3)；

C_w = 風壓係數，可查表 3.2

P_w = 在局部風壓下未擾亂流中的靜壓；

v_w = 在高層建築上的風速， m/s (ft/s)

當經由氣象得知風速及風壓係數時，便可由公式(3.2)、(3.3)求得作用在建築表面上的風壓。

而影響風壓係數 C_w 的三個因素為下列三項：

- (1) 建築物的幾何外型
- (2) 風向
- (3) 周遭建築物和地形的影響

表 3-2 建築物外牆的風壓係數【16】

風向夾角 α (°)	風壓係數 C_w 值	
	迎風面	背風面
0	0.75	-0.4
15	0.7	-0.5
30	0.6	-0.48
45	0.45	-0.5
60	0.28	-0.48

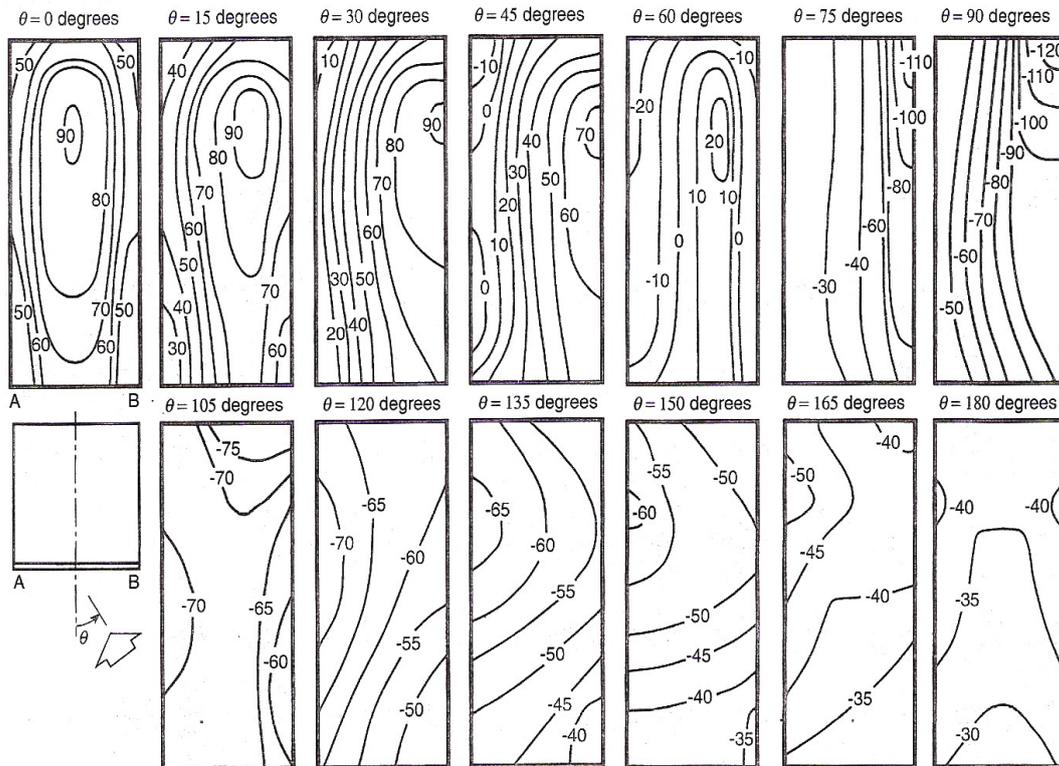


圖 3-11 在高層建築上不同風向的平均壁壓

圖 3-11 為模擬在都市區中高層建築上一正方形截面所受到的平均

風壓係數。當風向角 $\theta=0^\circ$ 時，表風與迎風面為正交，故壓力係數為正值。當 θ 逐漸增加時，側邊的 C_w 值也會逐漸增加，但 θ 增加到 30° 以上時，就有負壓的產生，故 C_w 值逐漸降低。當 $\theta=90^\circ$ 時，側邊上緣附近會造成最大負壓。當 θ 超過 100° 時，在側邊會產生分離流，故壓力差的變化較為不明顯。最後可知，在迎風面上的平均風壓，當風向角 θ 在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 時為正值， $60^\circ\sim 180^\circ$ 時為負值。

3.5 進氣與排氣對外開口配置之原則

3.5.1 建築物的進氣與排氣設計

新鮮空氣透過進氣口進入建築物內，同樣的建築物利用排氣系統來移除室內之空氣污染物。假如進、排氣口設計不良，污染物從外在來源附近(例如：交通工具廢氣的排放或工場製程廢氣)或是從建築物本身(例如：實驗室排出的有害氣體)和一些稀釋不完全的氣體污染物進入建築物內，對人體健康及室內空氣品質產生影響。

3.5.2 排氣塔與空氣進氣口設計策略

1. 排氣塔設計策略

利用外風場稀釋排氣口排出的氣體污染物的效果是有限的，在排出氣體污染物之前應該先經過過濾器、集塵器、洗塵器來減少污染。在一些情形，獨立的排氣系統是強制性的。需要結合考慮污染物的性質、與職業衛生和安全規範的考量。排氣塔設置之位置應儘可能遠離建築物近風口或週邊建築物。

如圖 3-12 所示，一棟建築物有一個排氣塔與 A、B 兩個進氣口，排氣塔距屋頂上方的高度為 h_s 。Wilson 和 Winkel【17】證明如果排氣塔之高度低於臨接的牆面或是建築物圍牆，透過排氣塔排出之污染物一般無法透過外風場稀釋，而容易在屋頂蓄積。排氣塔最佳的設置位置應該是在建築物最高屋頂處。

建築物之屋頂常常使用遮陽裝置防止日晒，然而這些裝置將會影響排氣所排出污染物之稀釋，影響程度將視遮陽裝置之穿透性、相對高度與其和排氣塔距離而定。

當進行空調通風設計之建築物太靠近大型建築、結構物或是較高之地形地勢（例如山坡）將會影響排氣塔之污染物稀釋，因為建築物有可能會位在這些大型建築或結構物之下風處所形成之循環回流區域內。

因此對於設計需排放有毒性或高危害性污染物之排氣裝置時應避免太靠近高層建築或陡峭林地或山坡。此外對於附近有較高的建築物的情況要進行空調通風進氣設計，需考慮避免因為距離太靠近，可能會受到該建築物排氣之污染。

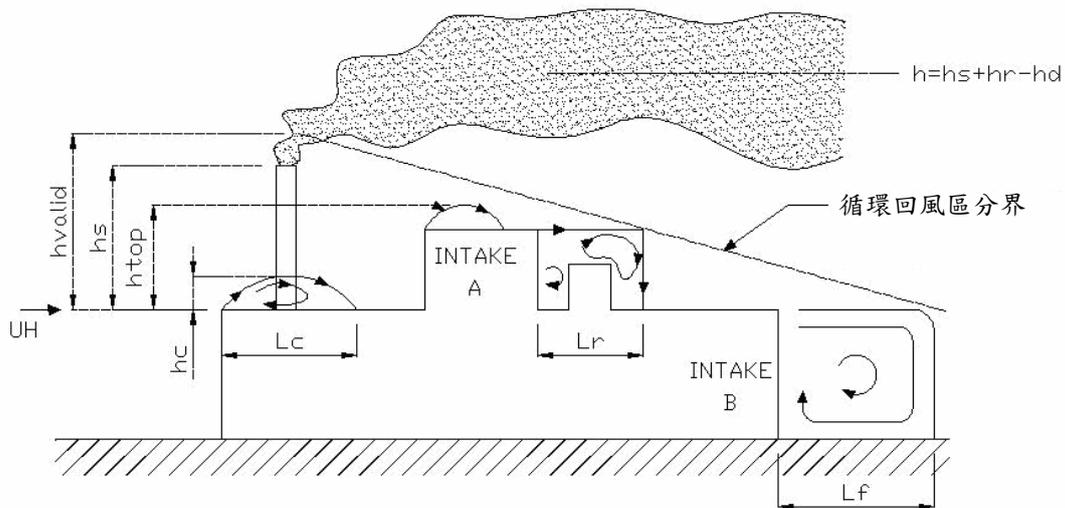


圖 3-12 排氣塔與進氣口距離形成與循環氣流區域之關係圖

排氣塔應該垂直設置並儘量不設置遮罩。排氣塔設置遮罩將影響排氣效果及其排氣煙流上升速度。小型圓錐雨遮通常無法完全排除雨水，因為雨水通常不是垂直落下，大雨伴隨著強風雨水就會從排氣雨遮進入排氣塔內。排氣速率 V_e 於 13m/s 可以防止因空氣中溼氣冷凝下來水及雨水進入排氣塔內。

2. 排氣塔排氣速度建議

較高的排氣塔排氣速度和溫度可以增加排氣煙流上升的高度，可以減少氣體污染物被帶入進氣口。排氣速度 V_e 應該維持在10m/s來維持適當的排氣煙流上升高度和與外氣稀釋，但是速度於超過15到20m/s時，排氣扇的噪音跟震動變成另外嚴重問題。排氣的出口裝設噴嘴(縮口)可以增加排氣速度與氣體煙流上升高度。

在較低的排氣速度下，當外風場所形成之風壓有可能會將排氣塔所排出的汙染物氣流往下帶，如圖3-13所示。排氣速度 V_e 應該至少是位於屋頂處高度外風場速度 U_H 的1.5倍，以避免排氣塔所排出的汙染物氣流被外風場之風壓往下帶。

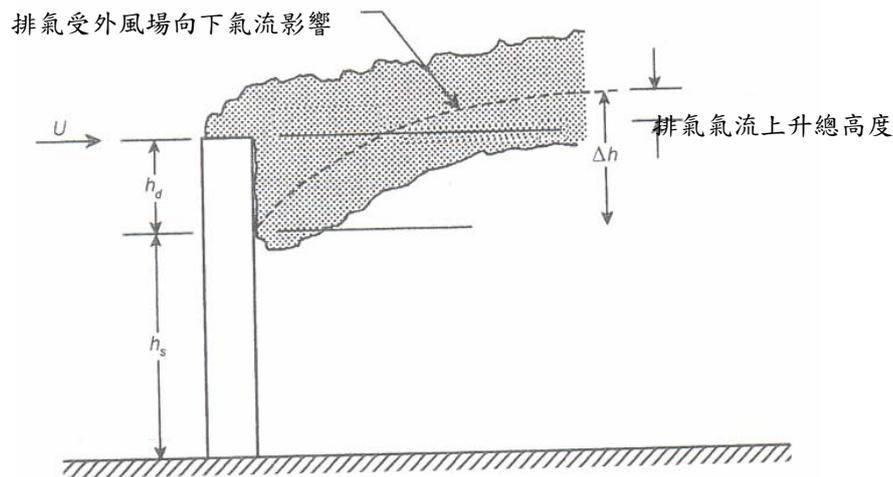


圖 3-13 排氣口受到向下氣流而降低有效排氣高度示意圖

3. 降低氣體污染物的空調進氣口設置

小心的設置規劃空調外氣進風口位置可以降低排氣塔設置高度的需求並且有助於維持適當之室內空氣品質。Rock and Moylan(1999)回顧評論近期有關空氣進氣口位置文章資料。Peterson and LeCompte(2002)也提出了將空氣進氣口設置於建築物側面的好處。

ASHRAE Standard 62 有關可接受的室內空氣品質之通風設計

中，強調需要適當規劃空調通風進氣與排氣位置，以避免受到空氣污染物影響。以下將描述在進行空調進氣口設計時所需考慮之不同外氣污染源狀況：

(1)蒸發冷卻水塔

退伍軍人症的發生與冷卻水塔中的水霧透過空氣被引入大樓中的細菌有關。ASHRAE Guideline 12 建議為了使退伍軍人症的危害降到最低需定期維持冷卻水塔的清潔，並且建議空氣進氣口、窗戶及人員活動之公共場所等應儘可能遠離水塔。但是並沒有相關最小間隔距離的標準或建議。

(b)建築物的整體排氣

將室內高濃度的二氧化碳、灰塵、建築材料產生的有毒氣體及人體產生氣味排出室外，排出的空氣沒有充分的稀釋不應該再被引進建築物內。

3.5.3 進氣口配置之一般原則

經驗法則提供一些空調進氣口配置原則。通常建築物進氣口位置不應該設置在污染源環繞的地方，特別是排氣風速低的排氣口(在圍幕內的回風區域)。從一些排氣稀釋的資訊可看出建築圍幕的影響。

假如有數個排氣口位於屋頂上，進氣口應該置於污染源最小的地方。對於具有相對較高的排氣塔或密集的排氣塔，假如此地點不會被其他位置之排氣口影響，則進氣口位置應儘可能靠近較高的排氣塔位置。然而在排氣風扇與煙囪間的正壓區域，污染物可能發生洩漏(Hitchings 1997;Knutson 1997)，所以進氣口不應設置在靠近高毒性或是有異味的排氣煙囪位置。

進氣口應該要避免靠近交通繁忙區域。遮棚在此區域內不能有效地防護進氣口，汽機車廢氣排放散佈超過大部分的建築表面。即使是

卸貨區常會有垃圾及廢棄物產生廢氣；貨車停放區也會產生廢氣。因此進氣口不應該設於靠近交通繁忙或貨車停放的區域。一般建築物排氣口也不應該靠近室外污染源，因為在一些情況下會發生排氣口氣流回流的問題(Seem et al.1998)。

測試環繞於建築物的氣流能找出進氣口的相關配置。當風向由直角吹向迎風面之牆面，造成外風場之氣流上升與下降，分成 2/3 沿牆面上升(如圖 3-14、3-15)。下降氣流將造成地面渦漩以致吹起灰塵與髒物(如 3-14)。利用外風場氣流遇到建築物會分向上、向下分流之特性，具有毒性或對人妨影響之污染物氣體之排氣口應設置於屋頂，而進氣口位置應設置低於建築物的 1/3 高度，但是須高於地面一定高度以避免地面的渦漩吹起灰塵、髒物以及交通污染廢氣之影響。假如主要的空氣污染源來自於地面(例如：因風揚起之粉塵與交通污染排放廢氣)，可考慮將進氣口設置於屋頂。；

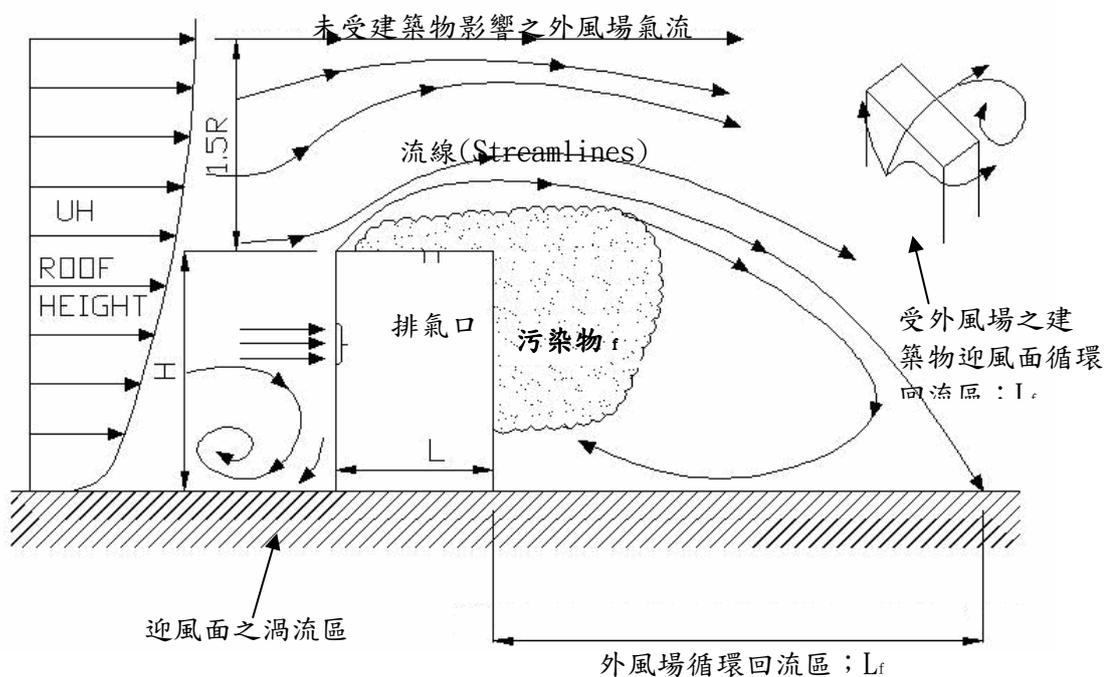


圖 3-14 矩形建築物周圍外風場之氣流流型

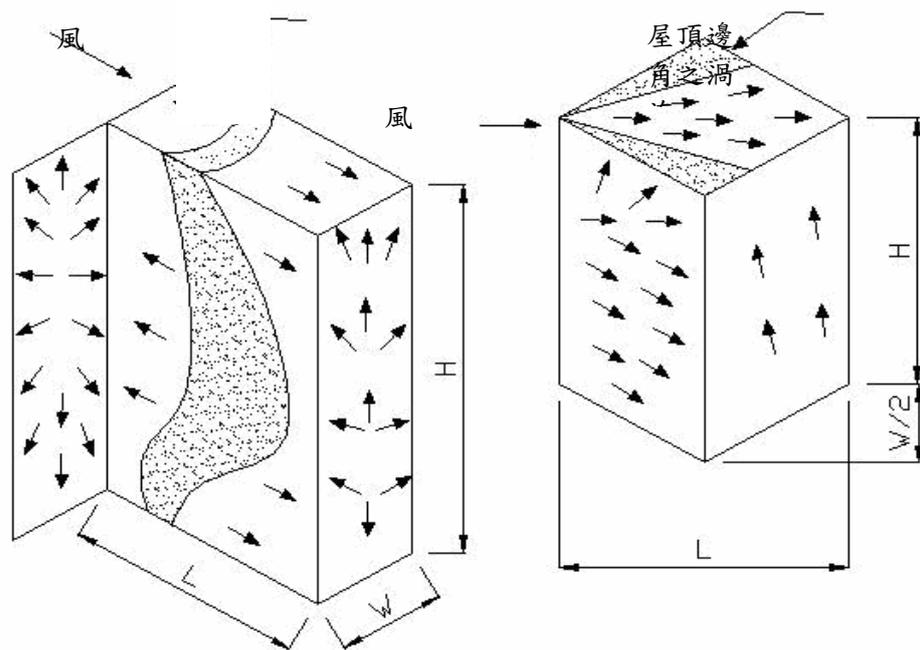


圖 3-15 建築物尺寸與建築物表面之氣流流型

3.6 國外規範之介紹

目前有許多典型的建築法規，各地方政府按需要加以採用或進行法規修正。建築師與建築設備設計者需要熟悉每個設計案所需符合當地與國家相關的規範。典型的機械和建築物配管規範對於某些情況下要求需有最小之間隔距離。然而，維持這些間隔距離卻不一定能保證進氣口污染源就不會存在。

在美國已被廣泛使用之統一機械法規(UMC)[IAPMO 1997a]即為一典型建築規範之例子。(UMC)之規範要求排氣口至少離建築線 0.9m 以上且與建築物開口之距離至少要 0.9m。空調箱進氣口應該要避免設置於回風處。具有油氣、爆炸粉塵、燃燒排氣及冷凍設備等場所需有特殊設計要求：進氣口與燃燒排氣口、建築管路、排氣口等至少需距離 3 公尺以上，且至少高於馬路 3 公尺以上。冷卻水塔需高於 1.5m 以上或距離進氣口 6m 以上。

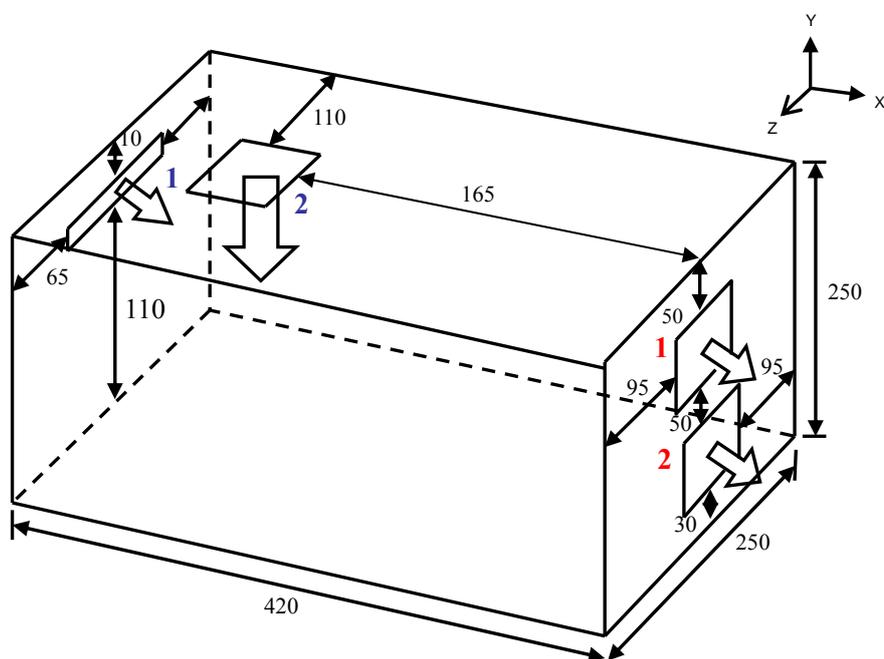
統一建築配管法規(UPC)[IAPMO 1997b]，要求家用熱水器排氣口需距離通風進氣口 0.9m 以上或高於通風進氣口 0.9m 以上。廁所的通

風系統與必須距離通風進氣口 3m 以上或是高度超過通風進氣口 0.9m。當 UPC 與 UMC 要求不一致時，則以 UPC 為主。不過地方審判可以修改法規，所以與模型法規相比較，被採用的版本可能有相當不同的要求

第四章 實驗分析

4.1 實驗目的

本研究將利用一全尺寸多功能通風實驗室進行空調風口配置對室內空氣品質影響之實驗分析，空間尺寸如圖 4-1 所示。實驗採用二氧化碳當作室內空氣污染物指標，進行室內換氣率之實測與通風效率評估，在室內釋放定量的 CO_2 ，經過濃度感測器測量，感測二氧化碳濃度衰減狀況，進一步改變通風出口及進風口位置，進行數據比較分析，評估最佳通風配置，比較不同通風系統設計對於污染物排除效率的差異，將這些影響人們健康的污染物有效排除，以期達到有效改善室內空氣品質的目的，並可將實驗數值與 CFD 電腦解析結果進行分析比對，期使能確立 CFD 解析於探討室內空氣環境之未來應用性與確立其信賴度。實驗空間的進排氣口配置如圖 4-1 所示。



- 1.單位：cm
- 2.進氣口、排氣口各有 2 個不同位置
- 3.所有進排氣口尺寸如圖 4-12 ~ 4-14 所示

圖 4-1 實驗空間尺寸示意圖

4.2 實驗操作流程

本研究探討不同進排氣口模式對室內空間環境通風效率的影響，為求實驗之準確性必須考慮實驗空間的密閉性，因此針對此點本實驗即選擇在一環境控制良好的空間中進行。而實驗之檢測與操作流程如圖 4-2 所示。

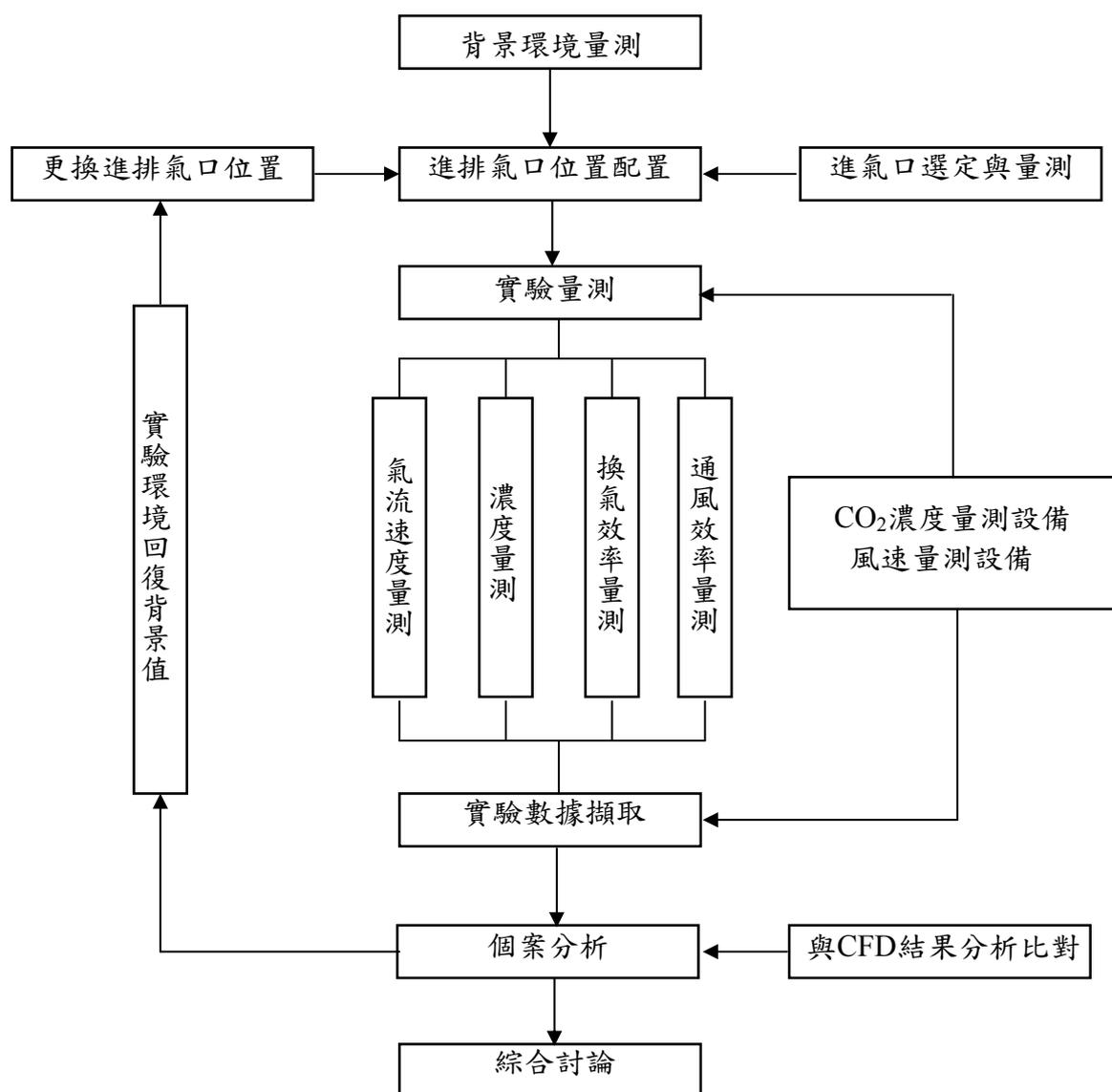


圖 4-2 實驗操作流程

4.3 實驗設備說明

1. 多功能通風系統實驗空間

本研究探討不同進排氣口模式對通風效率的影響，為求實驗之準確性必須考慮實驗空間的密閉性，因此針對此點本實驗即選擇在一環境控制良好的空間中進行，該空間位於國立勤益科技大學冷凍空調實驗室內，其尺寸大小為 4m(長)×2.5m(寬)×2.5m(高)，實際外觀如圖 4-3 所示。



圖 4-3 實驗空間實際外觀圖

本研究共分為 4 組進氣口與排氣口的設計組合，而進氣口的風速共有 4 種，進風口 1 之風速為 0.358m/s 與 0.716m/s，進風口 2 之風速為 0.573m/s 與 1.145m/s，因此共有 8 種案例要探討，而此 8 種案例的詳細內容說明如表 4-1 所示。

所採用進風速度主要是參考美國冷凍空調學會(American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers；ASHRAE)對於不同的作業環境訂出了最小通風率的建議，如表4-2所示。本研究分別採用

6ACH與12ACH分別進行不同進氣量之影響分析。

表 4-1 探討案例個數分析表

進氣口位置編號	排氣口位置編號	進排氣口風機速度(m/s)	進氣口進氣量(m ³ /hr)	進氣口換氣率(1/hr)	案例名稱
1	1	0.358	157.68	6	case1-1-6ACH
1	1	0.715	315.36	12	case1-1-12ACH
1	2	0.358	157.68	6	case1-2-6ACH
1	2	0.715	315.36	12	case1-2-12ACH
2	1	0.573	157.68	6	case2-1-6ACH
2	1	1.145	315.36	12	case2-1-12ACH
2	2	0.573	157.68	6	case2-2-6ACH
2	2	1.145	315.36	12	case2-2-12ACH

表4-2 不同的作業環境訂出了最小通風率的建議 (ASHRAE) 【1】

室內環境型態	換氣率	外氣需求	外氣率
一般辦公室	4~10	20 cfm 每人	--
教室	6~20	15 cfm 每人	--
走廊	--	0.1 cfm	--
大中庭	4~15	15 cfm	--
餐館	12~15	12 cfm	--
醫院病房	4	--	1/3
醫院隔離室	15	--	1/3
醫院感染病房	6	--	1/3
生化實驗室	4~10	--	1/3
動物實驗室	4~10	--	100%
解剖室	12	--	1/6
化學品儲藏室	6	--	1/3

註： 1.換氣率：供氣量與室內體積比 (Air Change per Hour, ACH)

2.外氣率：外氣量與供氣量之比

3.cfm：流量的單位 (cubit ft per min)

2.進排氣設備

本實驗進排氣口各安裝一組無段變頻式風機，以提供新鮮空氣進入與排除含有污染物質的氣體。無段變頻式風機的實體如圖 4-4 所示。

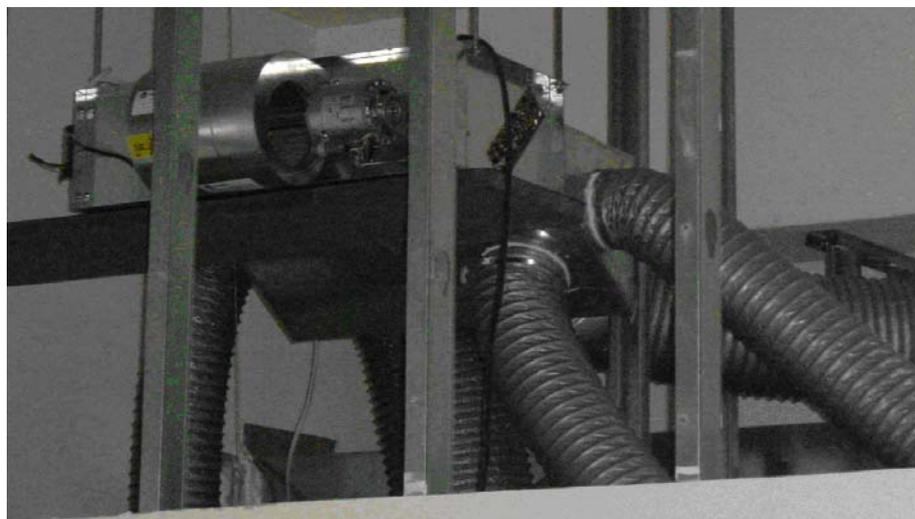


圖 4-4 無段變頻式風機

3. 風速量測設備

本實驗有關風速與風量量測的設備採用 ALNOR 風罩式風量計及 TSI Model 8386A 風速/溫濕度計，其外觀如 4-5 圖及圖 4-6 所示，此風罩式風量計可同時量測風量及風溫，其溫度量測範圍為 32°F~122°F；風量量測範圍為 50~2000CFM；TSI 風速/溫濕度計，其量測範圍為溫度：-17.8~93.3°C，相對溼度：0~95%RH；風量量測範圍為 0~50m/s。

4. 二氧化碳濃度量測與釋放設備

本實驗有關濃度量測的設備共有兩種，第一種為 ALNOR Model 8650 型 CO₂ 濃度測棒 2 支，如圖 4-7 所示，其量測範圍為 0 至 5000ppm，分別放置在進口與出口處；另一種為 GMW22 型 CO₂ 濃度量測器 4 組及奧地利 E+E CO₂ 傳送器，分別放置在 P1 至 P8 的量測點，其出廠正常狀態量測範圍在 0 至 5000ppm 之間，且操作溫度範圍在 -5 至 +45°C，準確度為 ±1.5% 讀取值，此種量測器需與資料擷取器及電腦設備連結才能量測，有關資料擷取器的型號為 Fluke NetDAQ Logger Model 2640A 型，其外觀如圖 4-10 所示。有關 CO₂ 濃度釋放設備為 CO₂ 氣體鋼瓶。



圖 4-5 ALNOR 風罩式風量計



圖 4-6 TSI 風速/溫濕度計



圖 4-7 ALNOR Model 8650 型 CO₂ 濃度測棒



圖 4-8 奧地利 E+E CO₂ 濃度感測器



圖 4-9 GMW22 型 CO₂ 濃度感測器



圖 4-10 資料擷取器 Fluke NetDAQ Logger Model 2640A 型



圖 4-11 CO₂ 氣體鋼瓶

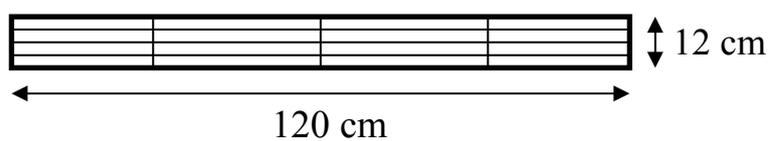


圖 4-12 出風口 1 尺寸示意圖

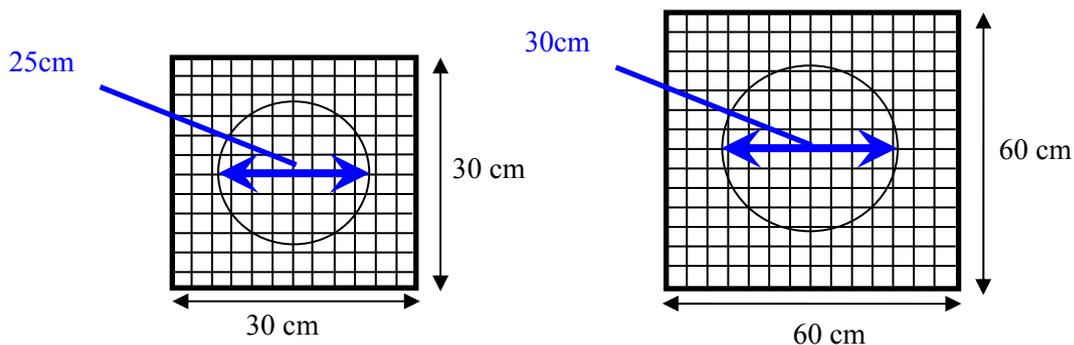


圖 4-13 出風口 2 尺寸示意圖 圖 4-14 回風口 1、2 尺寸示意圖

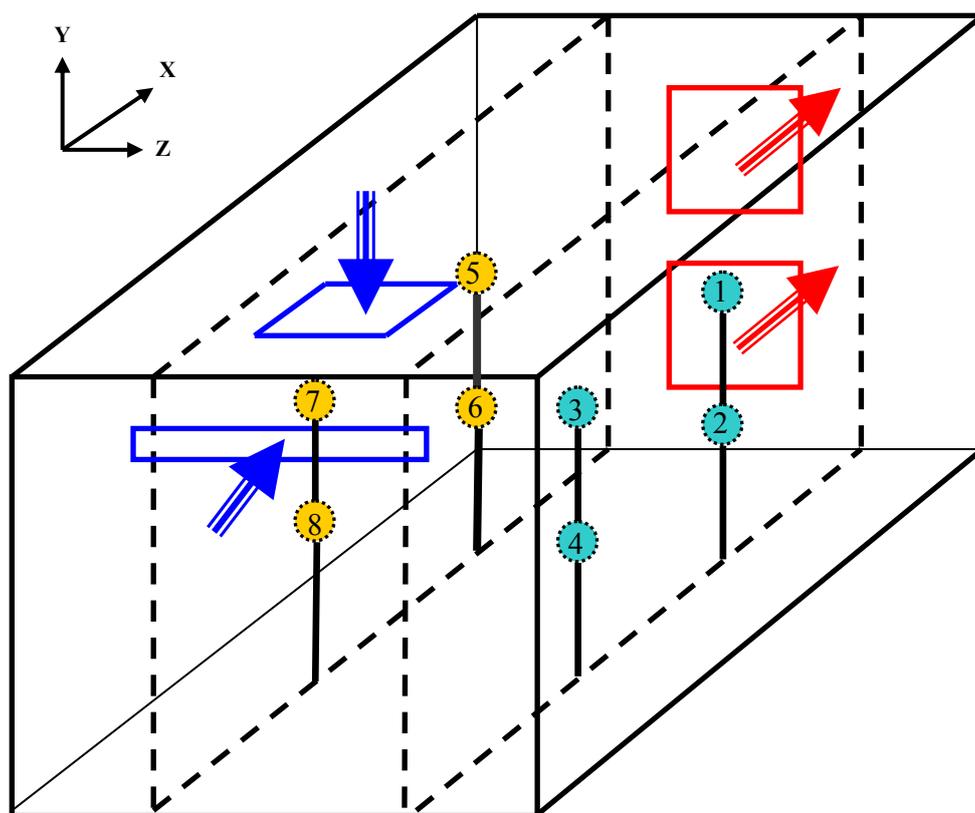


圖 4-15 實驗空間 CO₂ 濃度感測器量測位置示意圖

實際全尺寸實驗之風速計及 CO₂ 濃度感測器量測位置座標(如圖 4-15 所示)為：

- 1.(280,170,150)、2.(280,80,150)、3.(140,170,150)、4.(140,80,150)、
 - 5.(280,170,80)、6.(280,80,80)、7.(140,170,80)、8.(140,80,80) 與
- 進排氣口位置。

4.4 實驗結果說明

本研究利用示蹤氣體技術進行不同空調風口配置對室內空氣品質影響之實驗，實驗藉由量測空間內設置之示蹤氣體(CO₂)濃度感測器量測空間內示蹤氣體濃度隨時間變化情形，經由濃度分佈的實驗量測結果，利用方程式(2.28)計算出各種不同進排氣口相對配置設計時的通風效率，通風效率越好代表室內空氣品質越佳。各種通風配置之通風效率比較如表 4-3 所示。

由實驗結果可以發現出風口與回風口相對位置的改變會影響污染物移除效率，而隨著通風換氣量的增加，原先較佳的風口配置其污染物移除效率會隨之顯著提升，例如本實驗規劃之進風口 2、出風口 1 之配置。所得結果並將與 CFD 數值模擬結果進行比對，利用實驗驗證確立 CFD 數值模擬解析之信賴度與未來可行性。

表 4-3 各種案例之通風效率比較

案例編號(實驗)	通風效率 (%)
1-1-6ACH	19.51
1-2-6ACH	19.84
1-1-12ACH	26.77
1-2-12ACH	35.27
2-1-6ACH	27.21
2-2-6ACH	22.01
2-1-12ACH	40.17
2-2-12ACH	36.34

第五章 進排氣口配置對空氣品質影響之數值模擬分析

5.1 室內通風策略模擬分析規劃

本章主要利用 CFD 計算流體力學進行室內空間氣流與濃度分佈的模擬分析，針對室內空間在不同之排氣口配置下對空氣品質之影響進行分析探討，並配合實驗所進行的示蹤氣體濃度衰減實測，以及該空間的速度分佈實測，比較兩者間的差異性。藉此模擬結果可進一步瞭解進排氣口相對位置的不同配置與通風效率的相關性，以建立未來運用 CFD 數值解析預測污染物排除效率及室內空氣品質的方法。

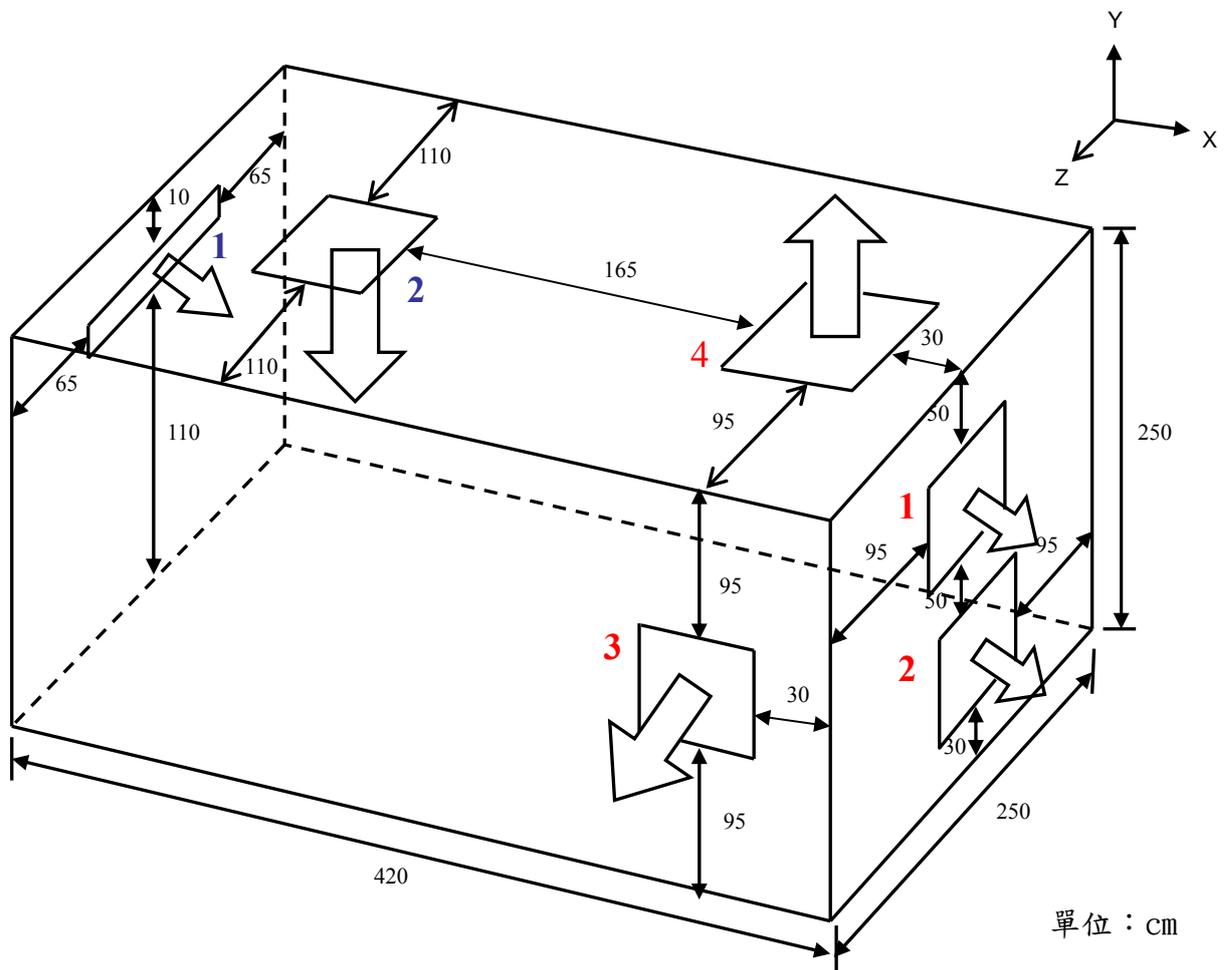


圖 5-1 模擬空間尺寸示意圖

本章模擬探討不同進排氣口相對位置與進氣量二項因子，為使探

討之結果可供回歸分析利用，本研究採取 8 組不同進排氣口的設計組合；與 2 種不同的進氣量，也就是不同的進氣風量，分別為 157.68m³/hr 與 315.36m³/hr，因此共有 16 種案例進行模擬計算與討論。對於此模擬空間進排氣口的相關位置尺寸必須配合後續實驗空間的幾何大小，其示意圖如圖 5-1 所示。CFD 解析各案例之設定如表 5-1 所示。本研究所採用之 CFD 軟體為 STAR-CD，其計算分析流程如圖 5-2 所示。

表 5-1 探討案例個數分析表

進氣口位置編號	排氣口位置編號	進排氣口風機速度(m/s)	進氣口進氣量(m ³ /hr)	進氣口換氣率(1/hr)	案例名稱
1	1	0.358	157.68	6	case1-1-6ACH
1	1	0.715	315.36	12	case1-1-12ACH
1	2	0.358	157.68	6	case1-2-6ACH
1	2	0.715	315.36	12	case1-2-12ACH
1	3	0.358	157.68	6	case1-3-6ACH
1	3	0.715	315.36	12	case1-3-12ACH
1	4	0.358	157.68	6	case1-4-6ACH
1	4	0.715	315.36	12	case1-4-12ACH
2	1	0.573	157.68	6	case2-1-6ACH
2	1	1.145	315.36	12	case2-1-12ACH
2	2	0.573	157.68	6	case2-2-6ACH
2	2	1.145	315.36	12	case2-2-12ACH
2	3	0.573	157.68	6	case2-3-6ACH
2	3	1.145	315.36	12	case2-3-12ACH
2	4	0.573	157.68	6	case2-4-6ACH
2	4	1.145	315.36	12	case2-4-12ACH

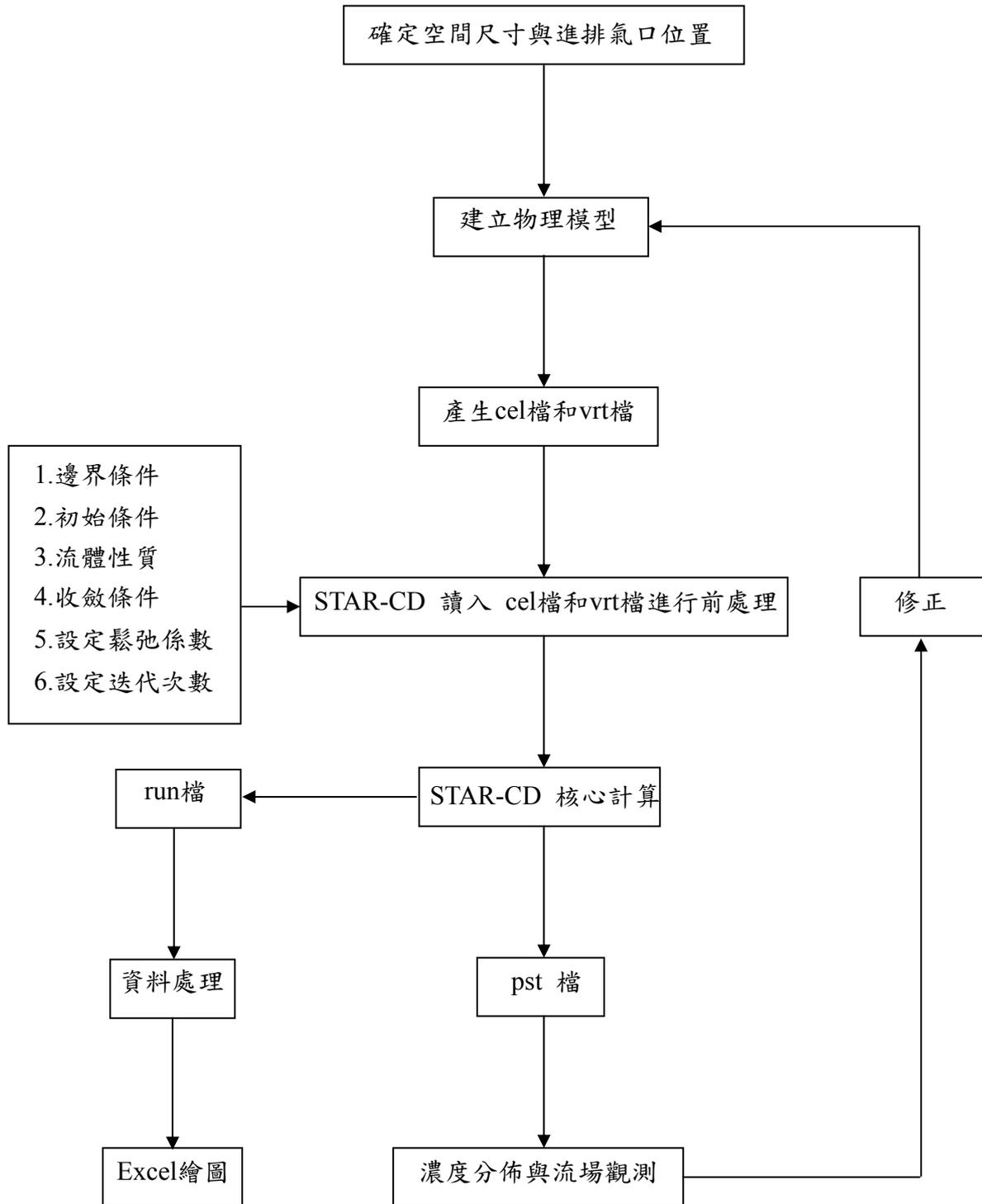


圖 5-2 STAR-CD 計算流程

5.2 數值模擬之數學模式

1. 統御方程式

本計劃研究之空間流場為三維穩態紊流，採用標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式模擬，其主要之統御方程式為連續方程式、動量方程式、濃度方程式、紊流動能（turbulence kinetic energy）與耗散率（dissipation rate）的傳遞方程式（transport equation）。而對於一般不可壓縮流體而言，STAR-CD採用卡氏（cartesian）張量標記法來求解質量及動量守恆方程式，可表示如下：

2. 連續方程式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (5.1)$$

3. 動量方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (5.2)$$

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j} \quad (5.3)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.4)$$

其中：

t ：時間。

x_i ：卡氏座標（ $i=1,2,3$ ）。

u_i ：流體在 x_i 方向構成的絕對速度

p ：全壓， $p = p_s - \rho_0 g_m x_m$ ，而方程式中之 p_s 代表靜壓，

ρ_0 為參考密度， g_m 為重力加速構成要素， x_m 為座標值。

ρ ：密度。

τ_{ij} ：應力張量（stress tensor）構成要素。

s_i ：動量來源 (momentum source) 構成要素。

4. 標準 k - ε model 之紊流動能方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \\ \mu_t P - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (5.5)$$

其中：

$$P \equiv 2s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5.6)$$

$$\mu_t = f_\mu C_\mu^{1/4} \rho k^{1/2} l \quad (5.7)$$

$$l = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (5.8)$$

5. 標準 k - ε model 之紊流耗散率方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = \\ C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t P - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (5.9)$$

上述方程式所用之 f_μ 、 σ_k 、 σ_ε 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 $C_{\varepsilon 4}$ 與 C_μ 為經驗係數，並且他們的值是 1.0、1.0、1.22、1.44、1.92、-0.33 和 0.09，而 μ_t 為紊流黏性(turbulent viscosity)。

6. 濃度擴散方程式：

$$\rho \frac{\partial C_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j C_m + F_{m,j}) = 0 \quad (5.10)$$

其中：

$$F_{m,j} = \rho D_m \frac{\partial C_m}{\partial x_j} + \overline{\rho u'_j C'_m} \quad (5.11)$$

$$C_m = \frac{m_m}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n} \quad (5.12)$$

在方程式中 $F_{m,j}$ 代表著擴散通量組成部分(diffusional flux)，而 C_m 代表著某混合物中之質量分率，另外 C'_m 則代表著紊流濃度之變化量，其應滿足 $\sum_m C_m = 1$ 。

5.3 數值模擬之數值方法

本研究利用數值方法來求解空間內之流場、與濃度場變化，採用之數值方法乃是應用計算流體力學 (CFD) 軟體STAR-CD來計計算，而所使用之模擬方法為用有限體積 (finite-volume) 法及SIMPLE來求解，而紊流流場採用標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式分析，以求解三維穩態 Navier-Stokes 方程式。

1. 有限體積法

對於有限體積法的計算方式，可由下面所示之一般型態自由座標的守恆方程式來推導：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi - \Gamma_\phi \text{grad}\phi) = s_\phi \quad (5.13)$$

其中 u 為流動的速度向量， ϕ 為代表任何因變數 (例如 u_i 、 e 、 k 等)，而 Γ_ϕ 、 s_ϕ 則為擴散係數 (diffusion) 與來源常數 (source)。根據方程式 (5.13) 來說，對於一個在移動的封閉表面 S 所組成隨著任意時間而變化之體積 V ，可由下式表示：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho\phi dV + \int_S (\rho u_r \phi - \Gamma_\phi \text{grad}\phi) \cdot dS = \int_V s_\phi dV \quad (5.14)$$

其中 S 為表面向量，而 u_r 則為流體 (u) 與 S 表面之間的相對速度，

若將V和S分別帶入格點 (cell) 的體積 V_p 與不連續表面 S_j ($j = 1, N_f$) 取代，則方程式(4.14) 變為：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_p} \rho \phi dV + \int_{S_j} (\rho u_r \phi - \Gamma_\phi \text{grad} \phi) \cdot dS = \int_V s_\phi dV \quad (5.15)$$

$T_1 \qquad \qquad T_2 \qquad \qquad T_3$

由此處向前移動，採用其近似值，則第一項 T_1 可近似如下方程式：

$$T_1 \approx \frac{(\rho \phi V)^n_p - (\rho \phi V)^o_p}{\delta t} \quad (5.16)$$

其中上標 o 代表著舊的時間座標，而上標 n 則代表著新的時間位置，主要是以 δt 作為區分。根據方程式(4.15)式對各項作離散，可得擴散項(diffusion terms)：

$$T_2 \approx \sum_j (\rho u_r \phi \cdot S)_j - \sum_j (\Gamma_\phi \text{grad} \phi \cdot S)_j \equiv \sum_j C_j - \sum_j D_j \quad (5.17)$$

而來源項(source term) T_3 則為：

$$T_3 \approx s_1 - s_2 \phi_p \quad (5.18)$$

對於對流項在本研究是使用UD(Upwind differencing)差分來處理，其定義 C_j 之方式由下列之式子表示：

$$C_j^{UD} \equiv F_j \begin{cases} \phi_p, & F_j \geq 0 \\ \phi_{N+}, & F_j < 0 \end{cases} \quad (5.19)$$

綜合上述可將方程式4.17式做精簡的通式寫法可得到如下：

$$A_p \phi_p^n = \sum_m A_m \phi_m^n + s_1 + B_p \phi_p^o \quad (5.20)$$

A_m 代表對流和擴散的影響，累加項為整體鄰近點的通量，其中

$$\begin{aligned} B_p &\equiv (\rho V)^o / \delta t \\ A_p &\equiv \sum_m A_m + s_2 + B_p \end{aligned} \quad (5.21)$$

2. SIMPLE 求解法

在處理不可壓縮穩態流場之Navier-Stoke程式，使用SIMPLE演算

法，此則是最普通應用的方法。Navier-Stokes方程式經離散化後可以整理出在x方向上的動量方程式為：

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (P_P - P_E) A_e \quad (5.22)$$

其中下標 nb 為一包含所有非 u 和 P 變數的常數項； A_e 則為 x 向上的正向面積，而 $\sum a_{nb} u_{nb}$ 項為對流和擴散效應之結合， b 為來源項其為主要體力（body force），同理， y 、 z 方向上的動量方程式為：

$$a_n v_n = \sum a_{nb} v_{nb} + b + (P_P - P_N) A_n \quad (5.23)$$

$$a_u w_u = \sum a_{nb} w_{nb} + b + (P_U - P_E) A_u \quad (5.24)$$

首先猜測壓力、速度為 P^* ， u^* ， v^* ， w^* 可得：

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (P_P^* - P_E^*) A_e \quad (5.25)$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (P_P^* - P_N^*) A_n \quad (5.26)$$

$$a_u w_u^* = \sum a_{nb} w_{nb}^* + b + (P_U^* - P_E^*) A_u \quad (5.27)$$

由於連續方程式所提供的是間接求解法，因此必須預測壓力場。假設 $P = P^* + P'$ ， P^* 為預測壓力、 P' 為修正壓力，由於 P^* 值的不同會伴隨對應有速度值 u^* 、 v^* 、 w^* ，即為：

$$u = u^* + u', \quad v = v^* + v', \quad w = w^* + w' \quad (5.28)$$

將方程式(5.13)與(5.16)帶入可得：

$$a_e u_e' = \sum a_{nb} u_{nb}' + (P_P' - P_E') A_e \quad (5.29)$$

消去 $\sum a_{nb} u_{nb}'$ ，得 $a_e u_e' = (P_P' - P_E') A_e$ ，即為速度修正方程式，可寫成為：

$$\begin{aligned} u_e &= u_e^* + \frac{A_e}{a_e} (P_P' - P_E') \\ v_n &= v_n^* + \frac{A_n}{a_n} (P_P' - P_N') \\ w_u &= w_u^* + \frac{A_u}{a_u} (P_P' - P_U') \end{aligned} \quad (5.30)$$

若考慮壓力修正方程式，則將前面所述之速度修正方程式代入，整理過後可得：

$$a_P P'_P = a_E P'_E + a_W P'_W + a_N P'_N + a_S P'_S + a_U P'_U + a_D P'_D + b \quad (5.31)$$

其中：

$$\begin{aligned} a_E &= \rho_e \frac{A_e}{a_e} \Delta y \Delta z, a_w = \rho_w \frac{A_w}{a_w} \Delta y \Delta z, a_N = \rho_n \frac{A_n}{a_n} \Delta z \Delta x, \\ a_S &= \rho_s \frac{A_s}{a_s} \Delta z \Delta x, a_U = \rho_u \frac{A_u}{a_u} \Delta x \Delta y, a_D = \rho_D \frac{A_d}{a_d} \Delta x \Delta y, \\ a_P &= a_E + a_W + a_N + a_S + a_U + a_D \end{aligned} \quad (5.32)$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{(\rho^0_P - \rho_P) \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y \Delta z \\ &+ [(\rho u^*)_s - (\rho u^*)_n] \Delta z \Delta x + [(\rho u^*)_d - (\rho u^*)_u] \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (5.33)$$

若 $b=0$ ，則整個流場滿足連續方程式，此時則不需再進行壓力修正，因此常數 b 可當作流場收斂與否的判斷依據。而SIMPLE演算法之流程如下所示：

1. 假設一猜測壓力值 P^* 。
2. 由三個動量方程式、紊流動能與消散率方程式推算得 u^* 、 v^* 、 w^* 、 k 、 ϵ 。
3. 求解壓力修正方程式可得到修正壓力。
4. 計算 $P = P^* + P'$ 。
5. 由速度修正方程式計算 u 、 v 、 w 。
6. 計算其他變數，如溫度、濃度、紊流等
7. 將 P 取代為猜測壓力值 P^* ，重複步驟(2)~(7)直到獲得收斂為止。

3. 收斂條件

在STAR-CD穩態的疊代 (iteration) 計算過程中，此程式對於某個特

定位置的格點和迭代次數 k ，定義質量殘差值 r_ϕ 為：

$$r_\phi^k \equiv A_p \phi_p^k - \sum_m A_m \phi_m^k - S_1 \quad (5.34)$$

而正交化絕對殘差值和（normalized absolute residual sum） R_ϕ^k 被定義成：

$$R_\phi^k \equiv \frac{\sum |r_\phi^k|}{M_\phi} \quad (5.35)$$

此殘值用以決定計算何時該停止，且其小於一預先設定收斂範圍 λ 值，做為其收斂條件：

$$\max(R_\phi^k) < \lambda \quad (5.36)$$

本研究模擬時則採用 λ 等於 10^{-4} 和疊代10000次做為收斂條件。

5.4 邊界條件設定

本研究探討不同進排氣口與進氣量對室內通風效率的影響，為了要驗證本研究使用之 CFD 數值解析模型的信賴度，因此在模擬時所給定的邊界條件必須與實驗相符，現就本研究於電腦 CFD 數值解析部分所模擬的邊界條件設定如下。

- (1)空間內所有的固體邊界均視為絕熱且無熱傳。
- (2)進氣口為均勻流且為固定質量流率邊界，且溫度保持在 300K。
- (3)排氣口為質量守恆之自由邊界。
- (4)室外 CO₂ 背景值根據實際空間出風口量測之 CO₂ 濃度值，假設為 650ppm。
- (5)室內污染源為 CO₂。

CFD 應用於解析室內空間氣流場與濃度場時，主要應用的數值方法是依據 Navier-Stokes 方程組衍生之簡算式，運用 k- ϵ 限定運算方式進行連續方程、動量方程與能量守恆方程組之近似計算。

而為了將探討的問題簡化，必須針對所探討的計算方式進行選定，因此本研究於 CFD 數值解析上做了以下的假設，如表 5-2 所示。

表 5-2 數值模擬之基本假設

計算類別	基本假設
速度場	1.穩態流場 2.紊流流場 3.牆面上的速度假設為零 4.採用泛用牆函數 5.三維直角座標 6.不可壓縮流場
溫度場	1.牆面為絕熱 2.室內溫度視為相等
濃度場	1.外氣 CO ₂ 背景值不變 2.CO ₂ 不參與任何反應 3.CO ₂ 與空氣為共存氣體 4.CO ₂ 屬於理想氣體狀態

由上述的邊界條件設定說明，本研究所使用的污染擴散指標為 CO₂，其性質安定不易與其他物質起變化，而其分子量為 44。本研究探討 2 種不同進氣風量，分別為進氣量分別為 157.68m³/hr 及 315.36m³/hr，而經由室內體積為 26.25m³ 可計算出進口換氣率分別為 6.01hr⁻¹ 及 12.01hr⁻¹。

本研究有關污染物濃度擴散現象主要靠氣體中各組成分子之運動方程式(Chemical species equation)來作模擬分析，氣體種類選用氮氣(N₂)、氧氣(O₂)與 CO₂ 三種，其中 N₂ 與 O₂ 是用來模擬空氣之用，在邊界條件設定時，進氣口氣流之 N₂ 與 O₂ 的質量分率分別保持在 0.2222 與 0.7724，而 CO₂ 初始值為 3000ppm，經由換算公式可求得其質量分率為 0.0054。

5.5 格點系統設定

本研究利用 **STAR-CD** 數值解析方式進行一般室內空間不同進排氣口位置與其通風效率的研究，對於進行解析的空間必須配合實驗空間的特性，因此在模擬時建立的網格尺寸和實驗空間大小相同，即 4m(長)×2.5m(寬)×2.5m(高)，進排氣口截面大小分為進風口一、二；進風口一的尺寸為 1.2m(長)×0.12m(寬)，進風口二的尺寸為 0.3m(長)×0.3m(寬)；進排氣口的風量依照邊界條件的設定必須為相等，才能達到定質量流率的條件。

而此模擬空間所設定的 X 方向格點數為 70，Y 方向的格點數為 42，而 Z 方向的格點數為 42；此外為了搭配排氣口 2 之尺寸，所以在網格部份做了局部加密處理，因此總網格數為 124488，此模擬尺寸與平面網格示意圖如圖 5-3 與圖 5-4 所示，而立體網格示意圖如圖 5-5 所示。

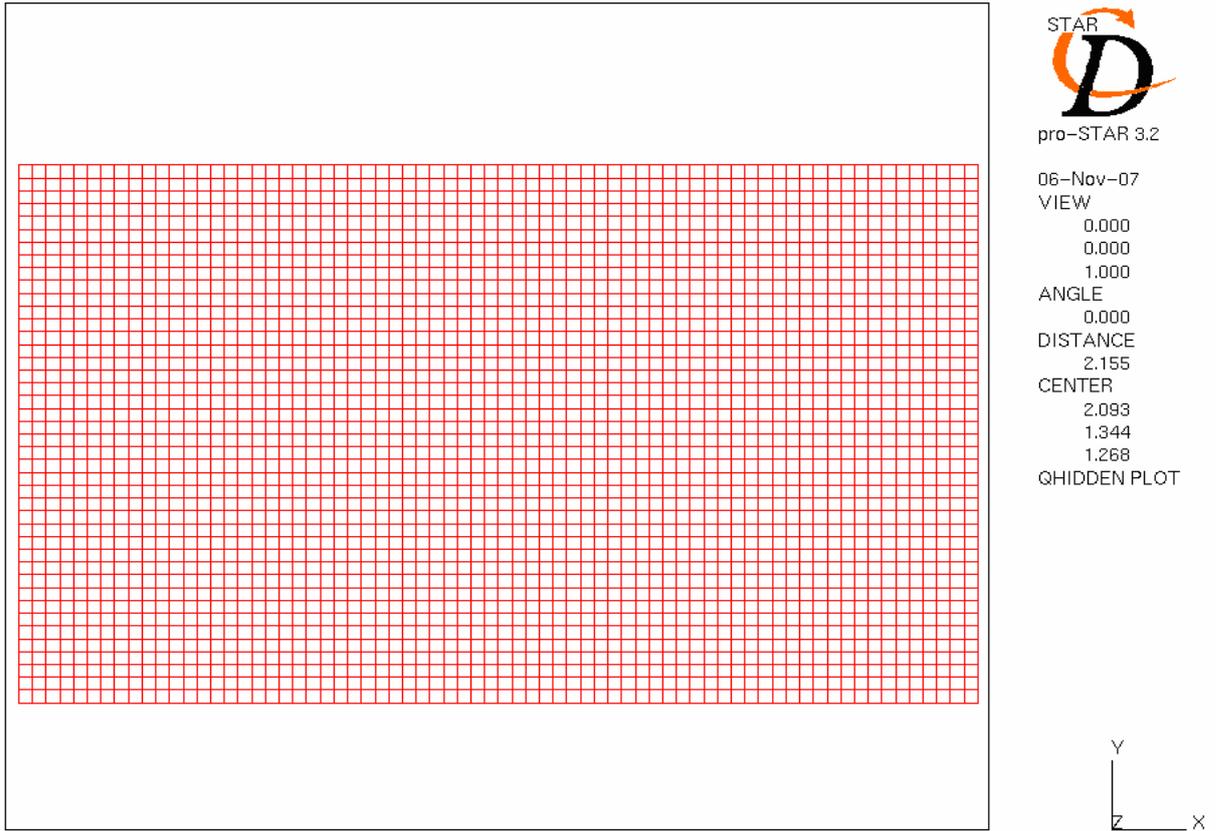


圖 5-3 XY 平面網格示意圖

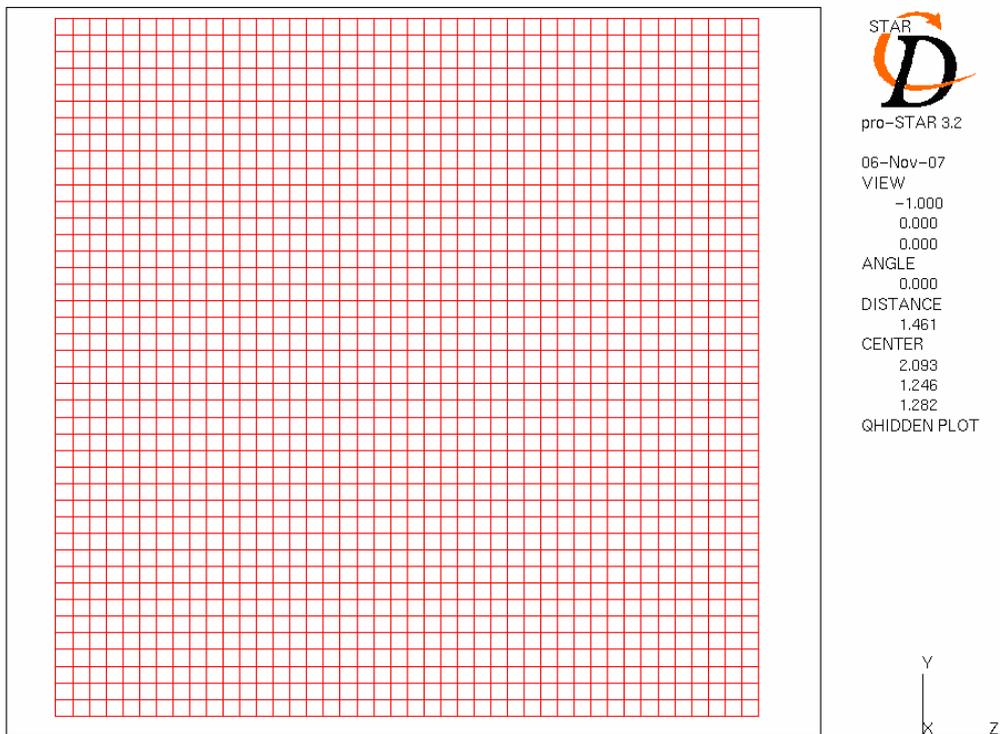
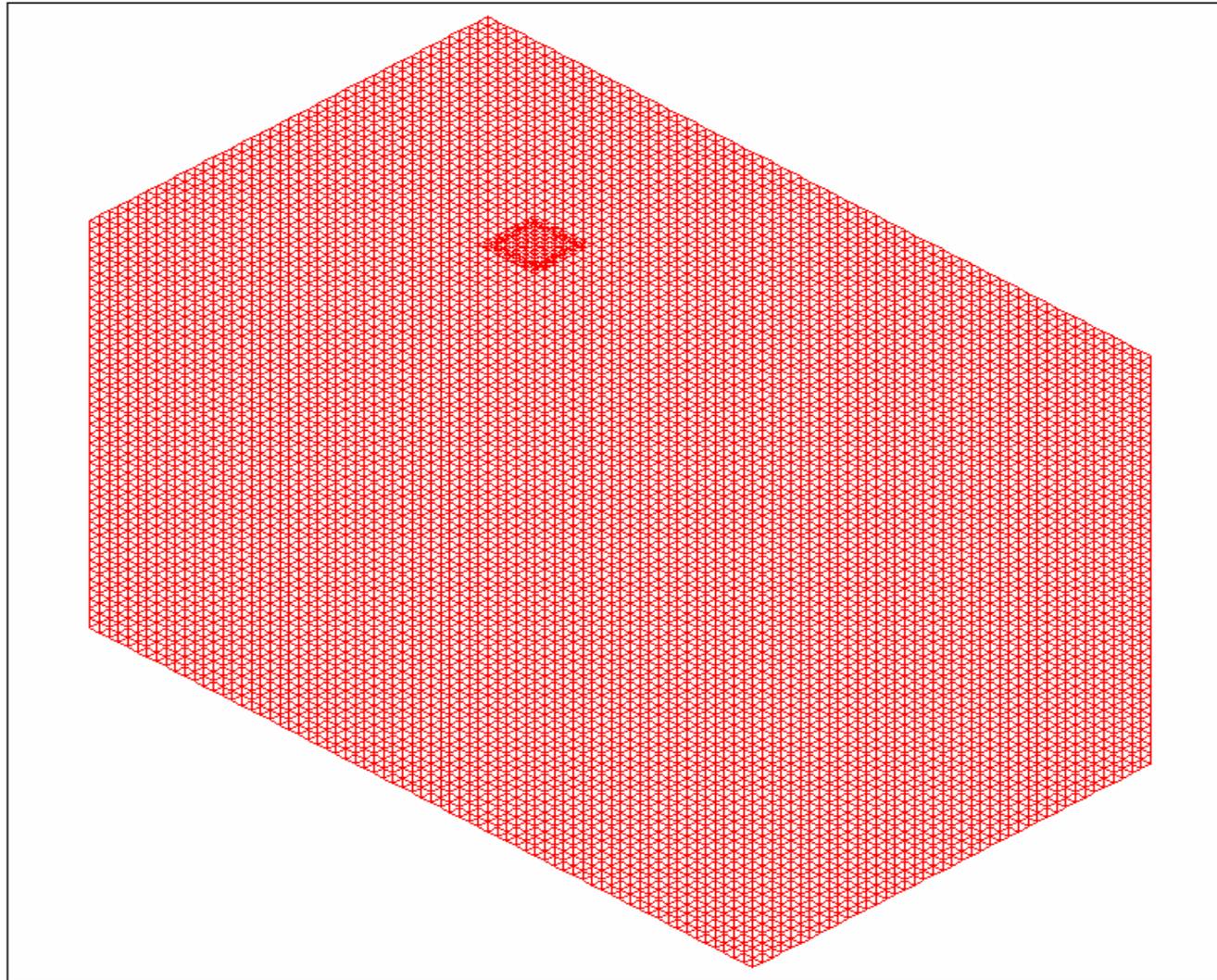


圖 5-4 YZ 平面網格示意圖



pro-STAR 3.2

06-Nov-07

VIEW

1.000

1.000

1.000

ANGLE

0.000

DISTANCE

2.750

CENTER

2.100

1.260

1.260

NORMAL PLOT

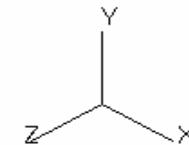


圖 5-5 XYZ 平面網格示意圖

5.6 外風場對空調風口對外開口影響之模擬

本節利用 STAR-CD 來模擬外風場對建築物進排氣口對外開口配置所造成的影響，模擬計算域(Domain)大小之設定參考 G. Evola 等人【17】模擬外風場計算域大小與建築物關係，其模擬空間配置如圖 5-6 所示。模擬之隔點配置如圖 5-7 與 5-8 所示。

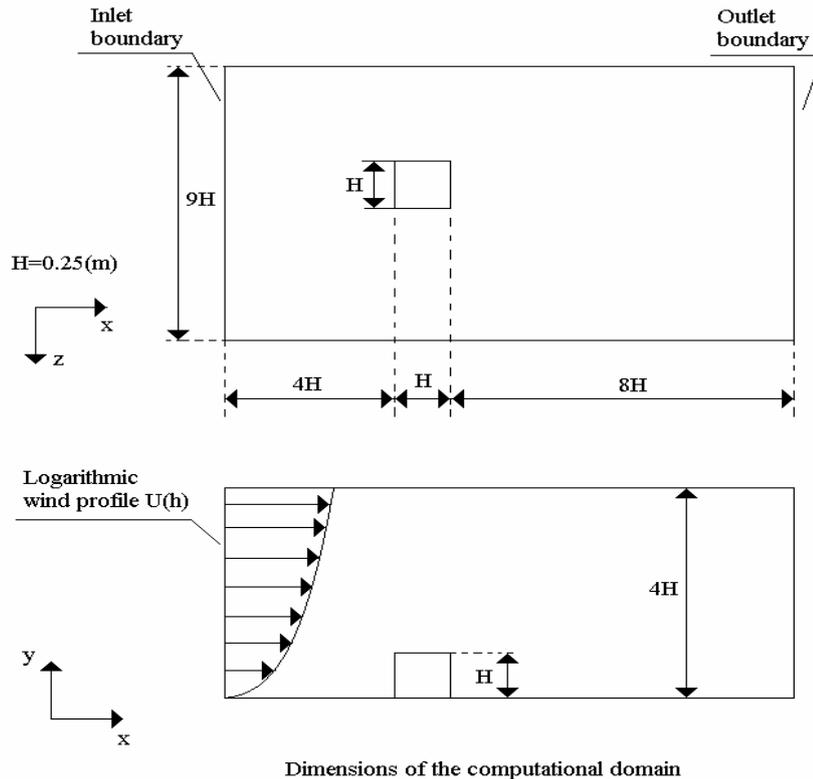


圖 5-6 外風場空間尺寸與建築物位置示意圖

外風場之風速會隨高度增加而變化，而模擬之外風場速度邊界條件，依據 Y. Jiang 等人【18】實驗所得之外風場風速梯度及相關參數進行設定。外風場速度隨高度變化之關係式如公式(5.37)可換算求得。

$$U(h) = \frac{U_0}{k} \cdot \ln \left(\frac{h}{h_0} \right) \quad (5.37)$$

其中：

$U(h)$ ：外風場風速隨著高度產生的變化

h : 建築物距地面高度

k : Von Karman's 係數 ; ($k=0.41$)

$U_0 = 1.068 \text{ m/s}$ and $h_0 = 0.005 \text{ m}$

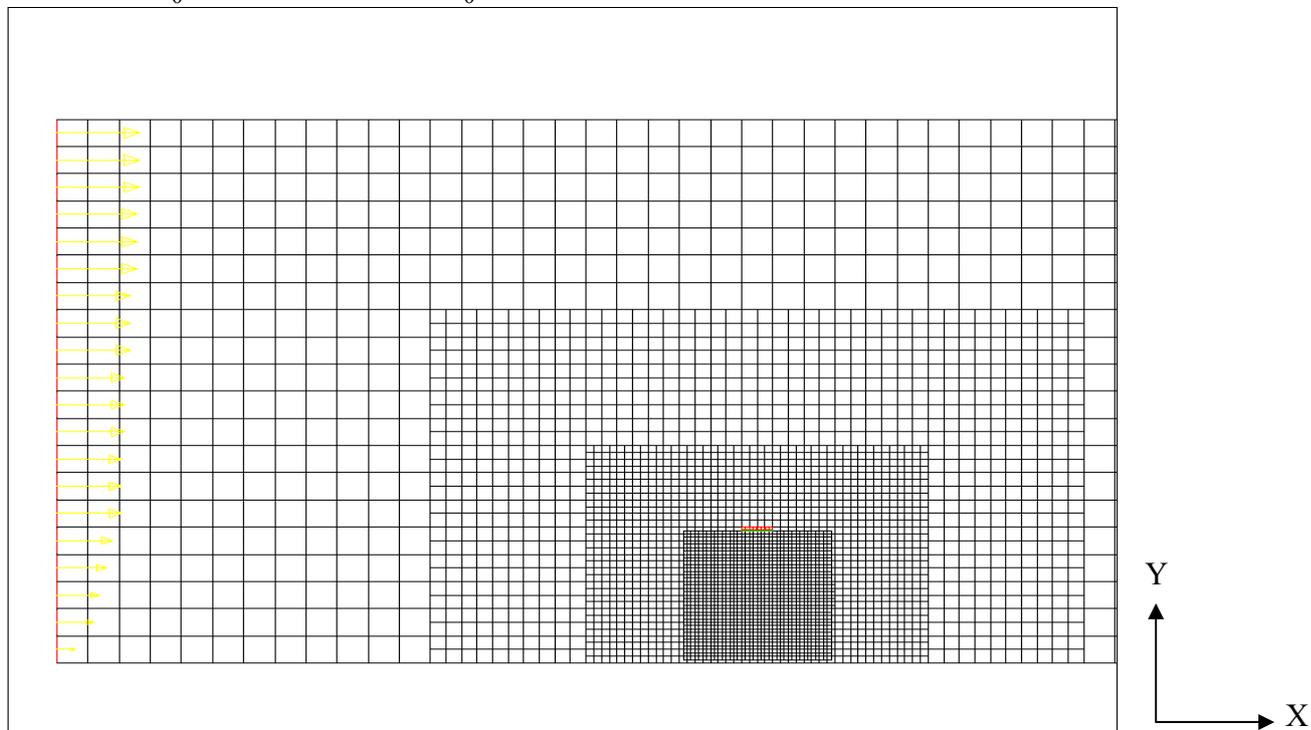


圖 5-6 XY 網格配置示意圖

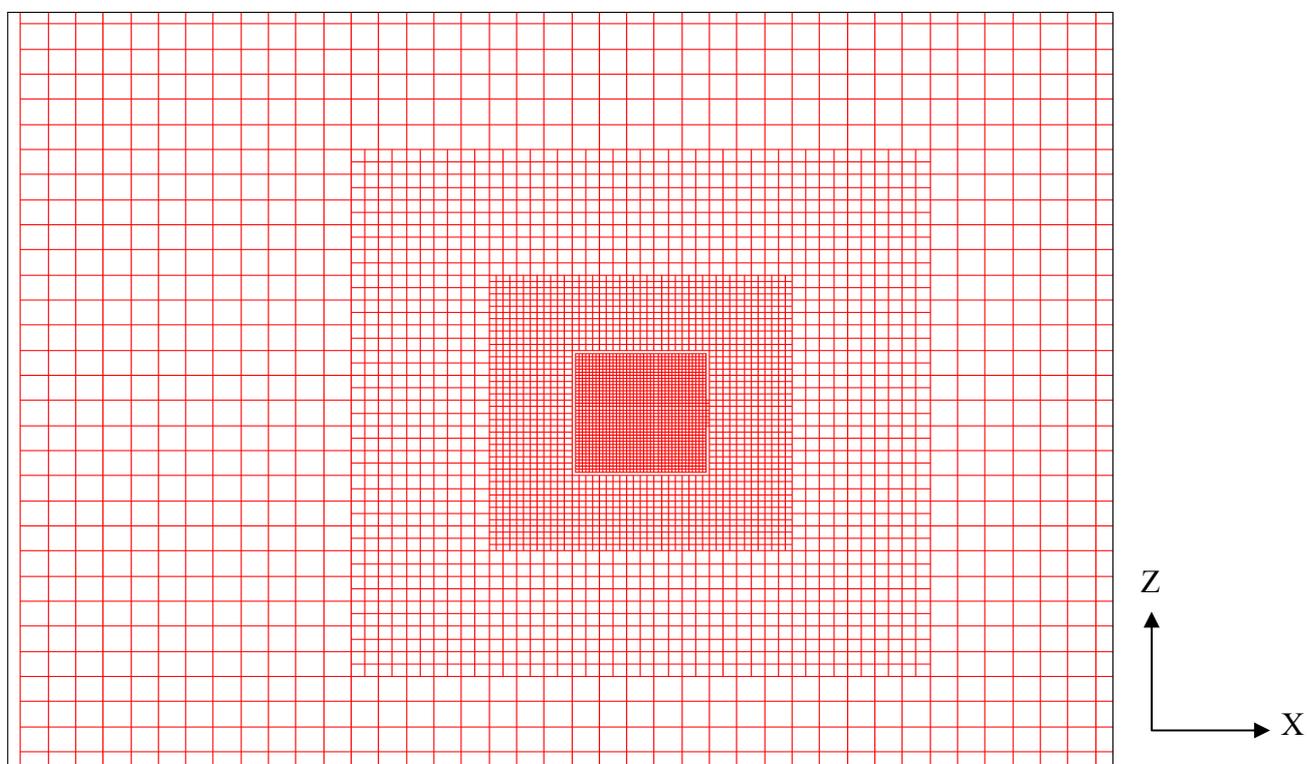


圖 5-7 XZ 網格配置示意圖

第六章 結果分析與討論

本研究採用全尺寸實驗搭配流場分析的方法模擬各種空調通風風口設計的室內空氣品質狀況。分析模擬配合全尺寸實驗室空間為 4m(長)×2.5m(寬)×2.5m(高)之空間。本研究在空調通風設計上的主要變數包括以下幾項：

- 1.換氣量：換氣量為稀釋污染氣體的基本能力，本研究以 6 ACH 與 12ACH 為通風換氣量的基礎，探討不同進風口進風量對室內空氣品質的影響。由於較大的換氣量會提高成本及運轉費用，過少的換氣量是無法達到污染排除的效果。
- 2.進排風口的風量位置分配：根據研究顯示進排風口的位置對污染排除效果的重要性在換氣量之上。

6.1 室內空調通風之氣流速度

不同空調通風配置將會於室內空間形成不同之氣流場分佈。而室內通風之氣流速度與分佈對室內空氣品質有直接的影響。例如通風氣流於空間形成渦流將導致室內污染物無法排出，而室內氣流速度過快會造成室內人員不舒服且可能未與室內污染物進行稀釋即經由通風口排出。

本研究針對氣流速度數值模擬的部分，所得結果為三維速度分量，但由於實驗部分量測風速使用的是屬於無方向性風速計，所量測結果為純量數值，因此若要比較兩者間的差異，必須將數值模擬所得之三維速度分量加以轉換為純量結果才可以比較，而其轉換公式如式(6.1)所示。

$$V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (6.1)$$

式中

V ：三維速度純量和、 u ：X 方向速度分量

v : Y 方向速度分量、 w : Z 方向速度分量

由以上的式子可以求得各案例於不同時間時各點的速度大小，而在實驗時時內空間所量測的點只有 8 點，因此在計算模擬結果時針對此 8 點的數值作轉換，此 8 點的速度大小分別依兩種不同進氣量所得到之結果如圖 6-1 至圖 6-4 所示。

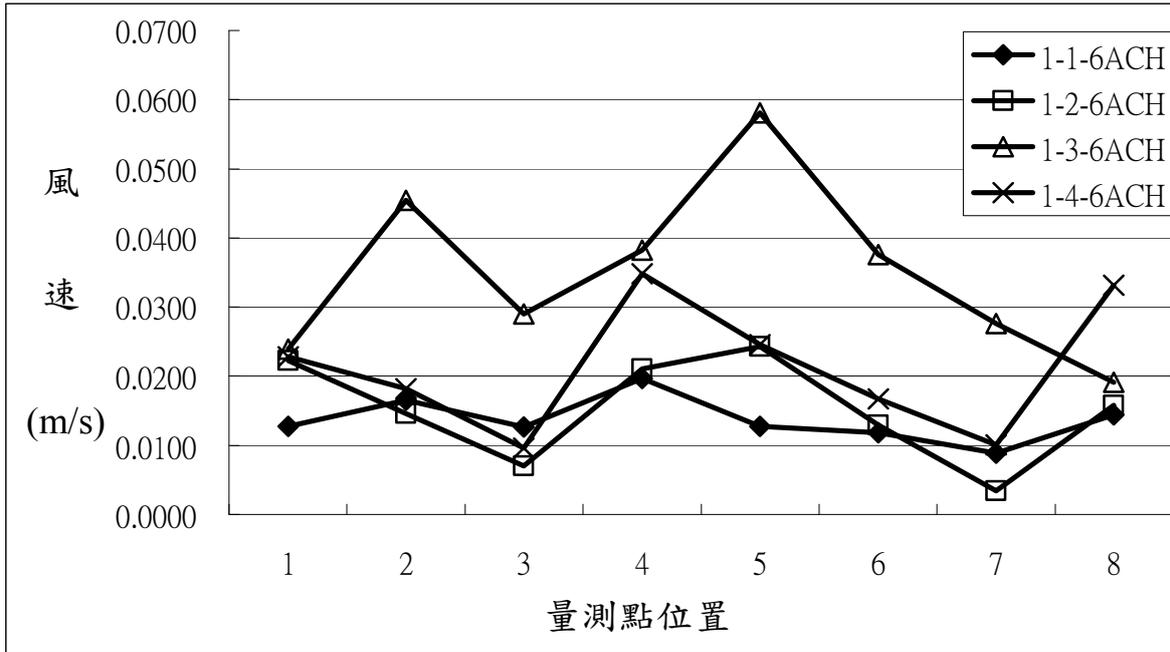


圖 6-1 進氣口 1-6ACH 各量測點氣流速度模擬結果

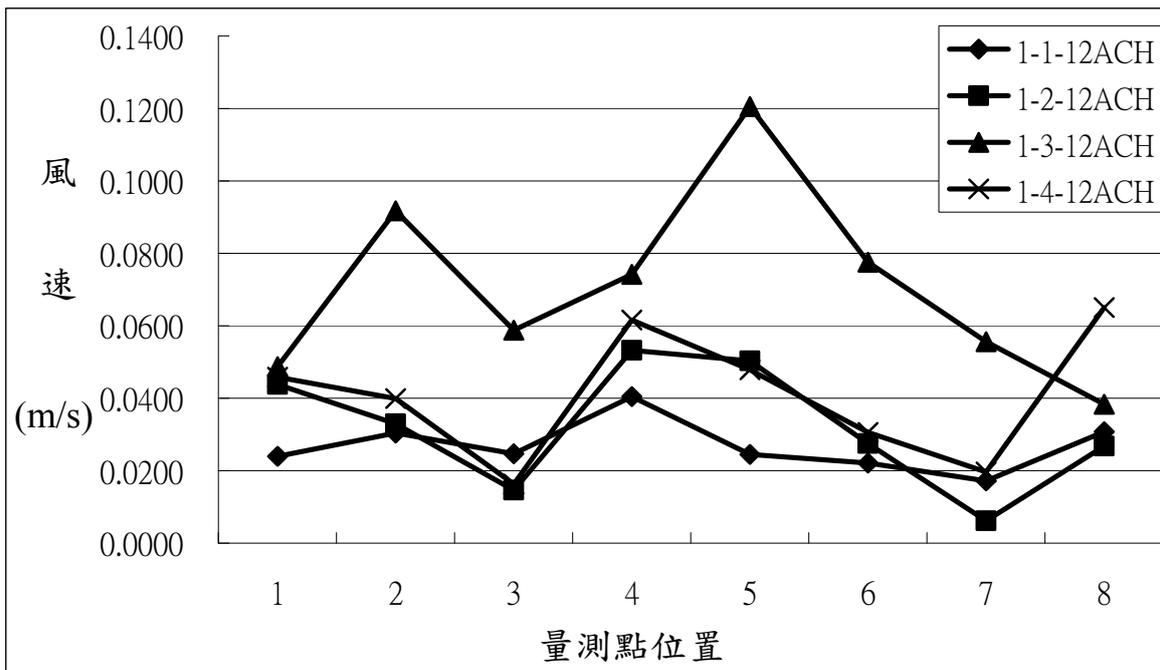


圖 6-2 進氣口 1-12ACH 各量測點氣流速度模擬結果

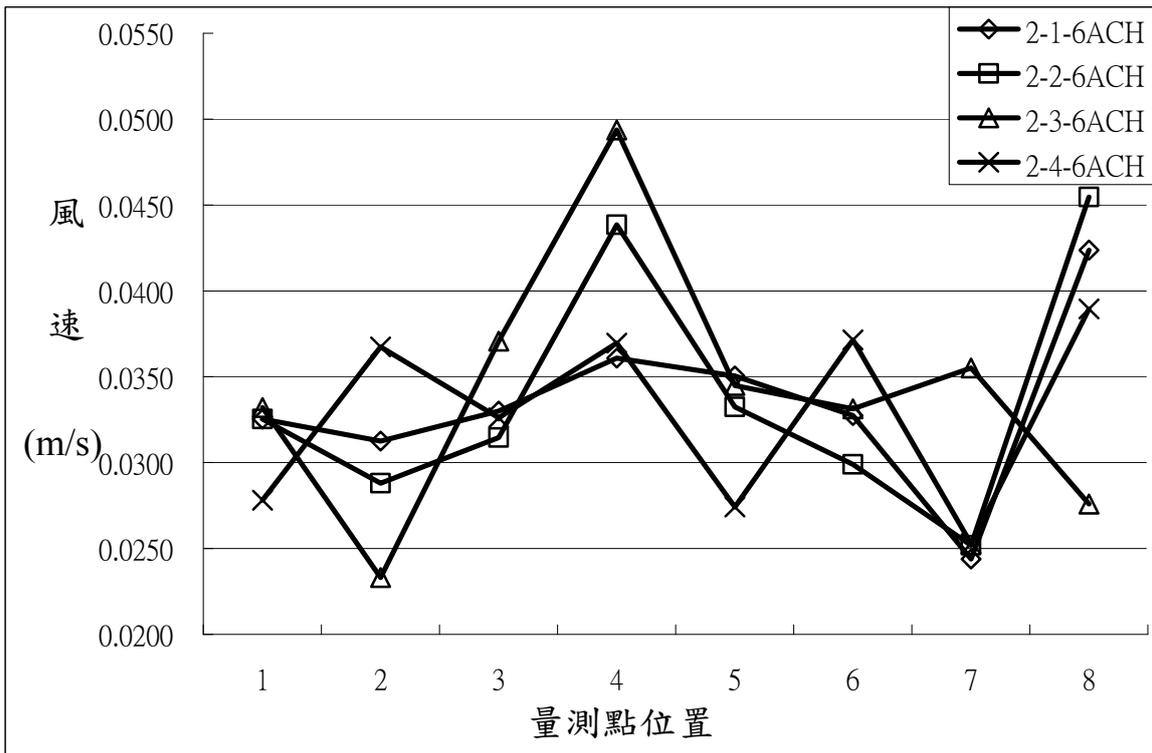


圖 6-3 進氣 2-6ACH 各量測點氣流速度模擬結果

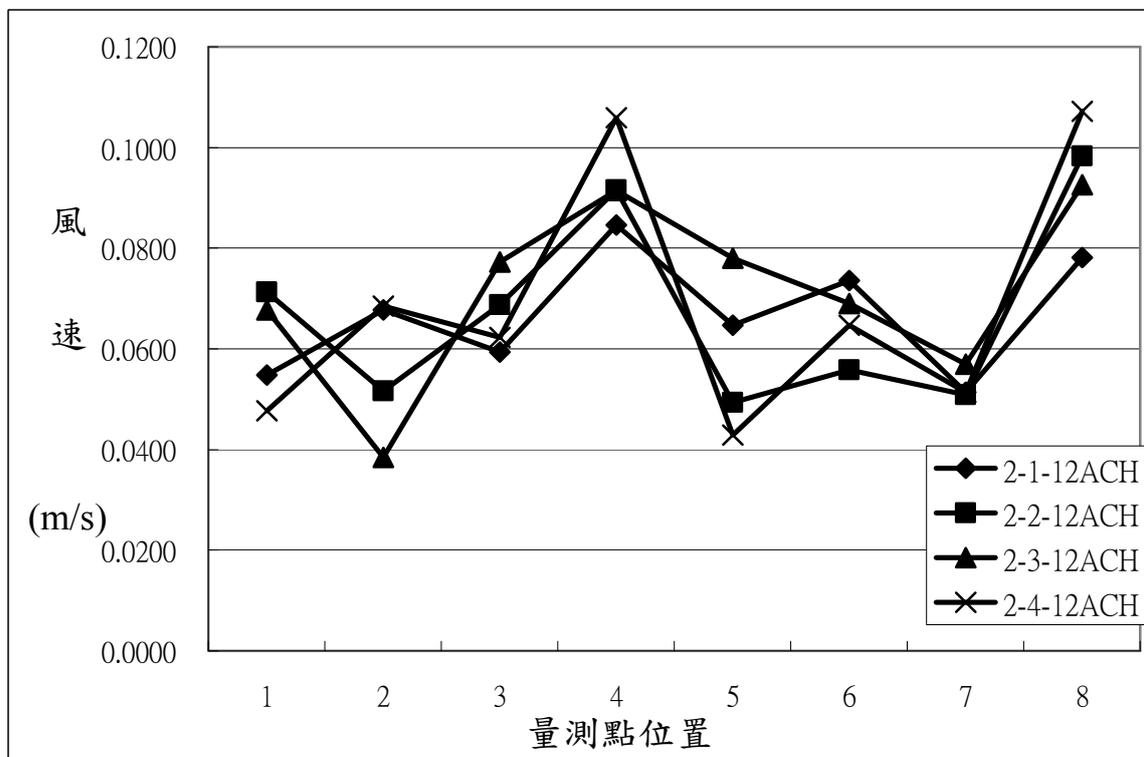


圖 6-4 進氣 2-12ACH 各量測點氣流速度模擬結果

6.2 室內空調通風之污染物移除效率與分布

經由濃度分佈的電腦模擬結果，可以利用方程式(2.28)計算出各種不同進排氣口相對位置設計時的通風效率，通風效率越好代表室內空氣品質越佳。圖 6-5 到圖 6-12 顯示各分析案例室內空間濃度隨時間變化情形。表 6-1 顯示各種不同進排氣口相對位置設計時的通風效率，以進風口 2 出風口 1 之風口配置情形其通風效率最佳；若進排風口皆位於天花板時（進風口 2 出風口 4）其通風效率最差。

此外可以發現當通風量增加為兩倍時，室內通風效率均會提升，然而提升效率個案例卻明顯不同，可以發現原本通風效率較好的風口配置，當通風量增加時其通風效率會有較顯著的提升。

如圖 6-13 到 6-28 顯示各種不同進排氣口相對位置設計時，室內污染物分不隨時間變化情形。經由圖 6-13 至 6-16 可知進氣口位置 1 與排氣口編號 1、2 之配置時，由於氣流可以較直接方式流出，當通風量增加為兩倍時氣流停留在室內時間較短，相對而言其整體換氣效率提升較不顯著。以上結果將會在下節與實驗結果進行比較。

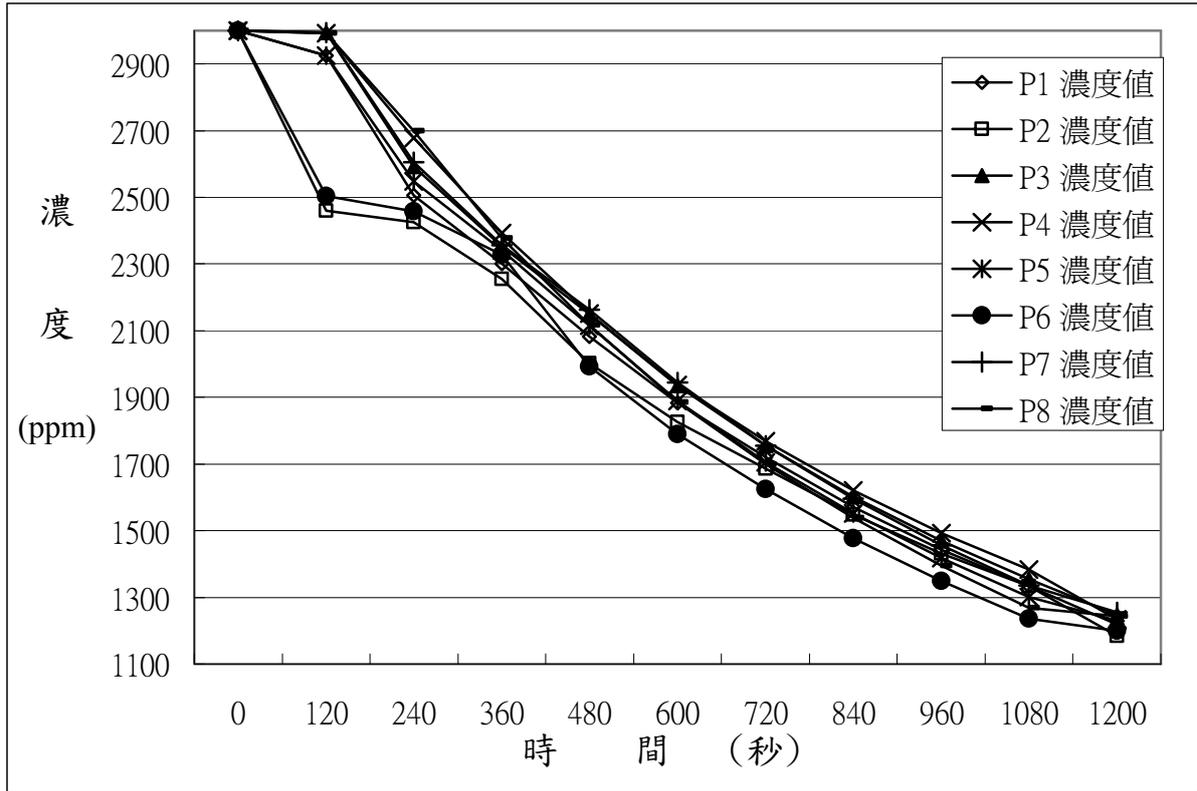


圖 6-5 case1-1-6ACH 0~1200 秒之 CO₂ 濃度變化曲線圖

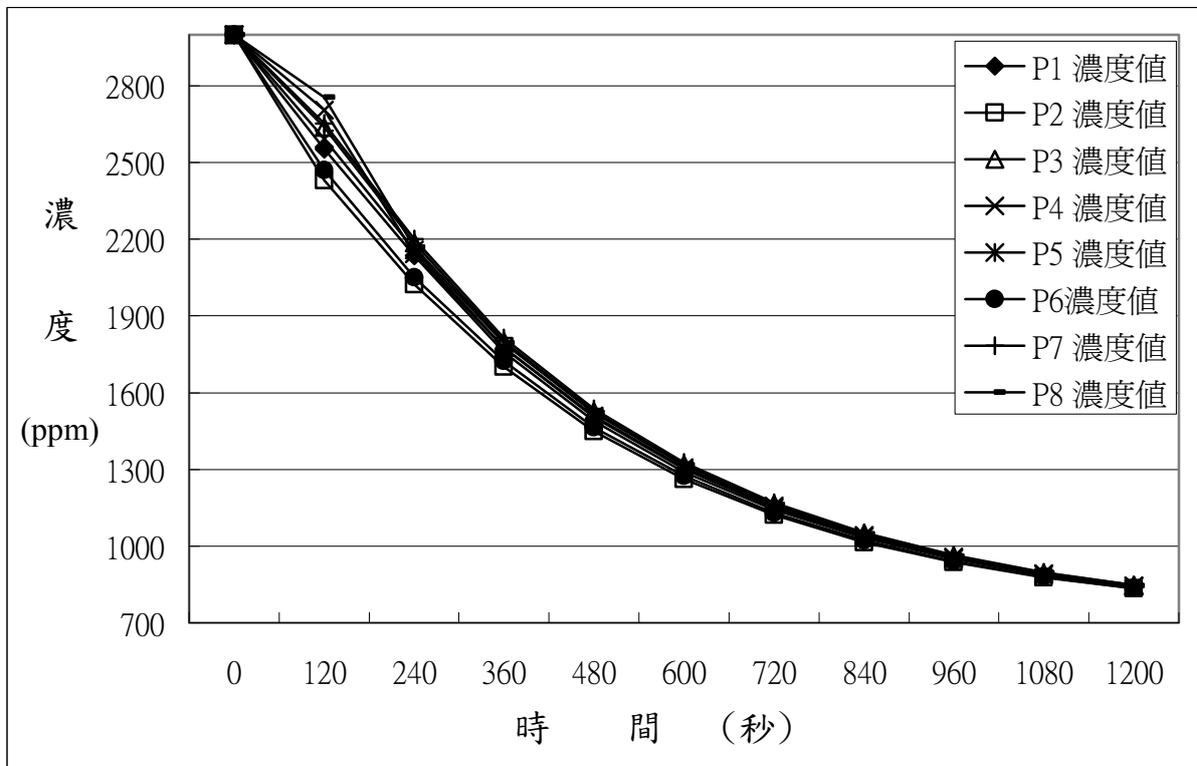


圖 6-6 case1-1-12ACH 0~1200 秒之 CO₂ 濃度變化曲線圖

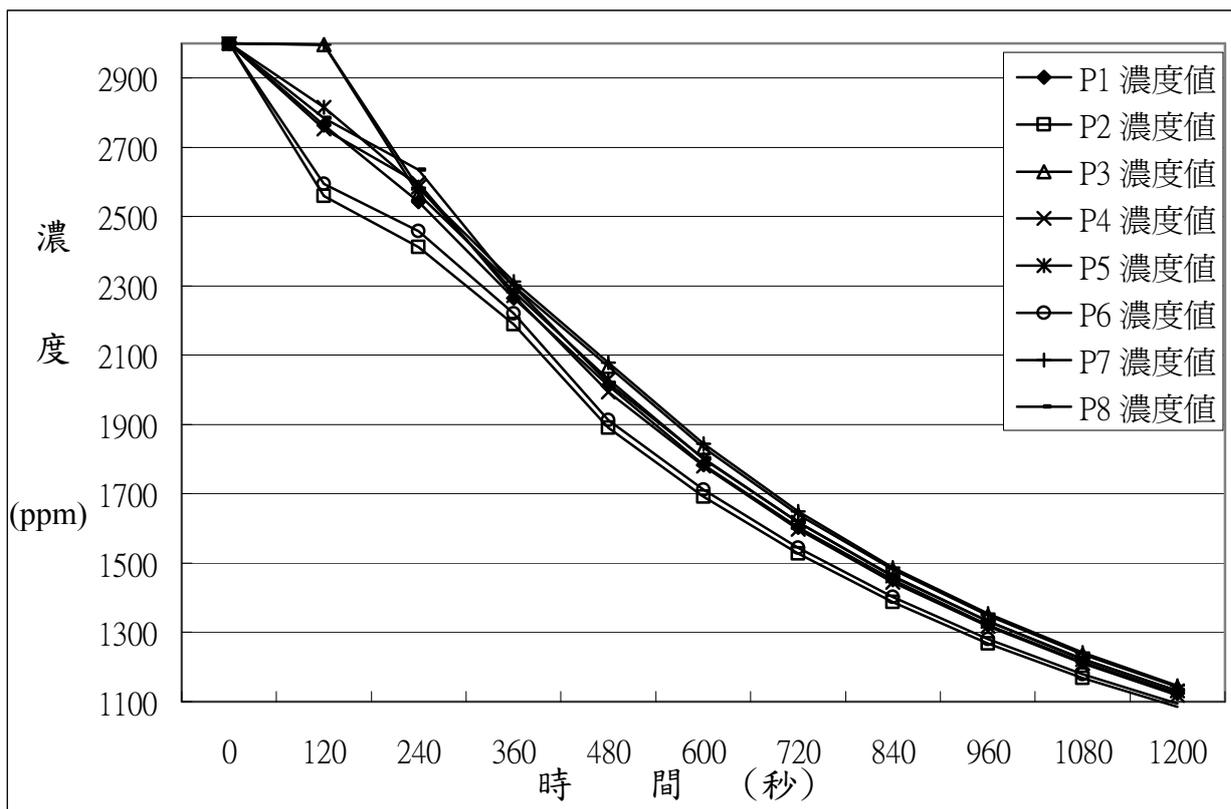


圖 6-7 case1-2-6ACH 0~1200 秒之 CO₂ 濃度變化曲線圖

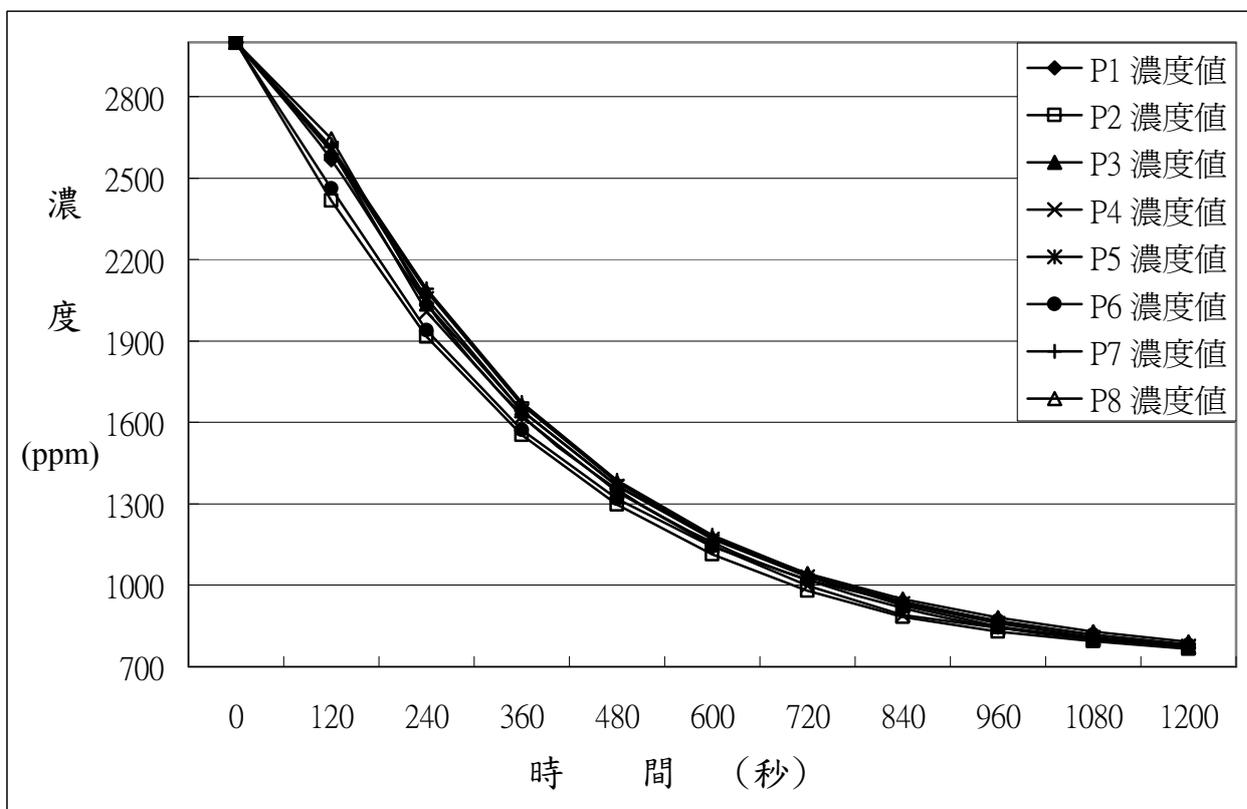


圖 6-8 case1-2-12ACH 0~1200 秒之 CO₂ 濃度變化曲線圖

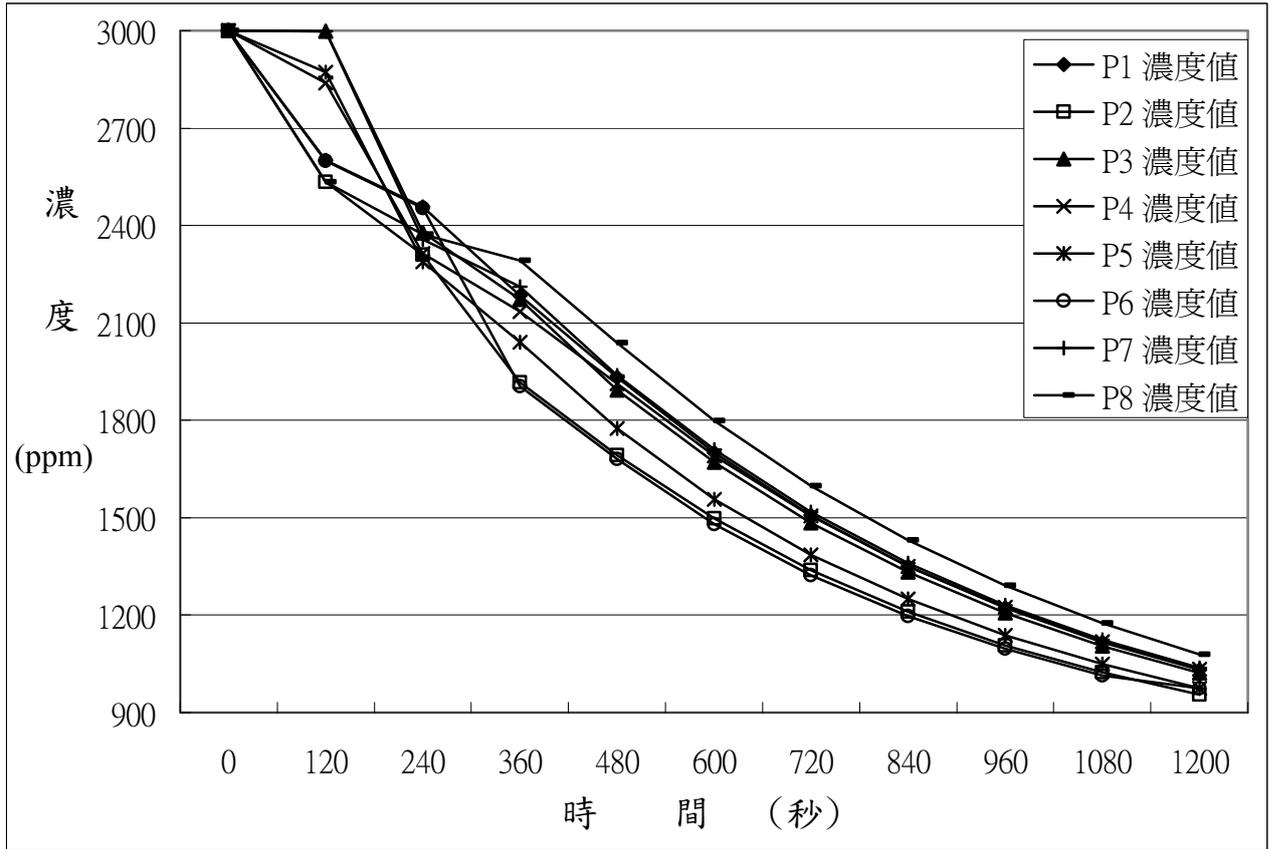


圖 6-9 case1-3-6ACH 0~1200 秒之 CO₂ 濃度變化曲線圖

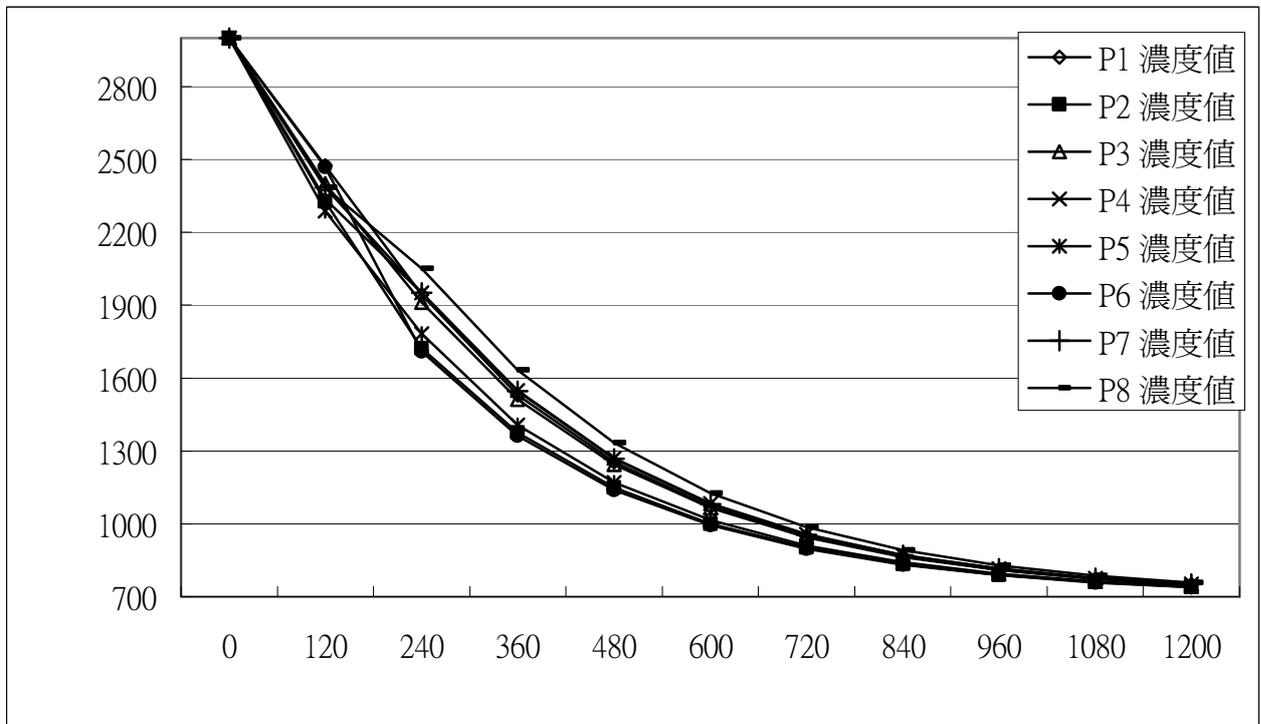


圖 6-10 case1-3-12ACH 0~1200 秒之 CO₂ 濃度變化曲線圖

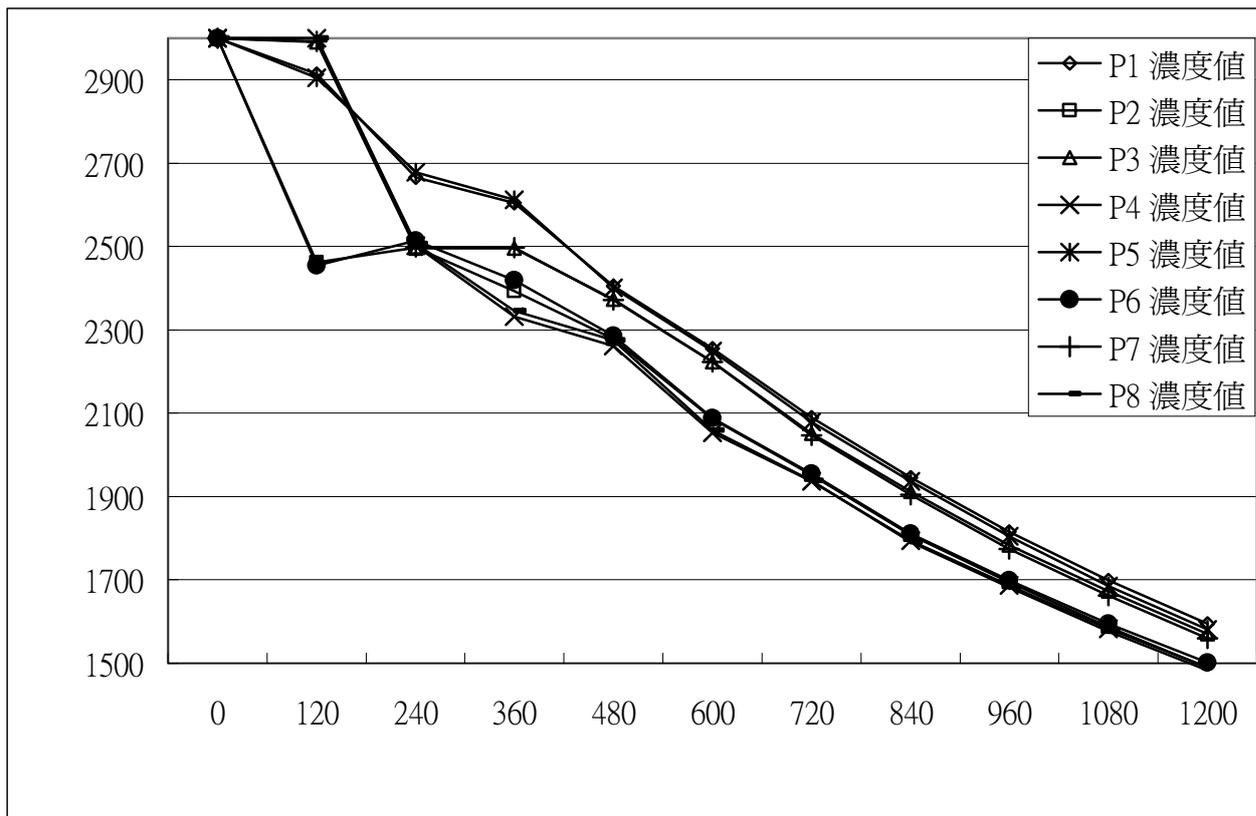


圖 6-11 case1-4-6ACH 0~1200 秒之 CO₂ 濃度變化曲線圖

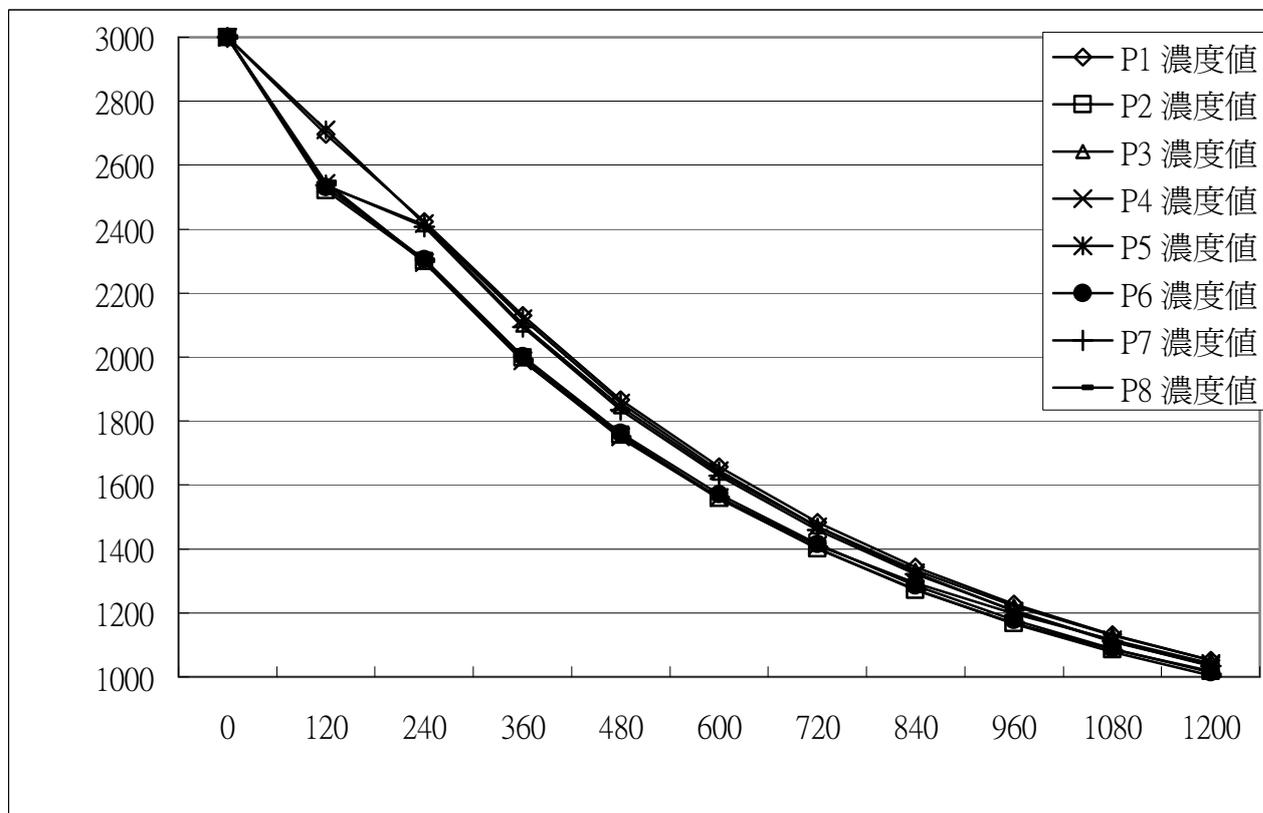


圖 6-12 case1-4-12ACH 0~1200 秒之 CO₂ 濃度變化曲線圖

表 6-1 各種案例之通風效率

案例編號	通風效率 (%)	案例編號	通風效率 (%)
1-1-6ACH	36.44	1-1-12ACH	46.92
1-2-6ACH	38.28	1-2-12ACH	53.26
1-3-6ACH	35.58	1-3-12ACH	41.84
1-4-6ACH	29.63	1-4-12ACH	37.28
2-1-6ACH	44.87	2-1-12ACH	64.06
2-2-6ACH	43.63	2-2-12ACH	58.67
2-3-6ACH	33.31	2-3-12ACH	37.65
2-4-6ACH	27.84	2-4-12ACH	34.69

提升

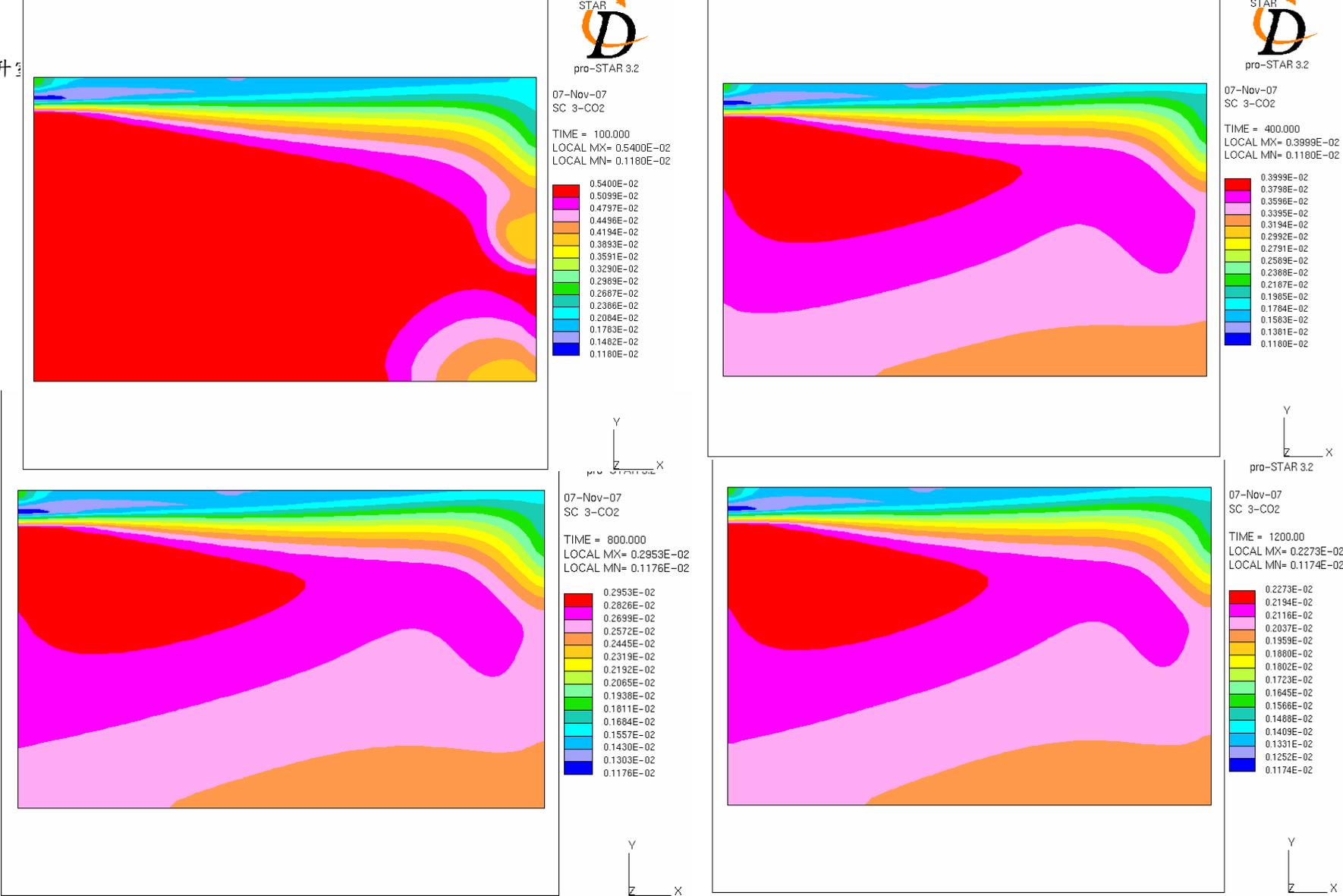


圖 6-13 Case 1-1-6ACH 8 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

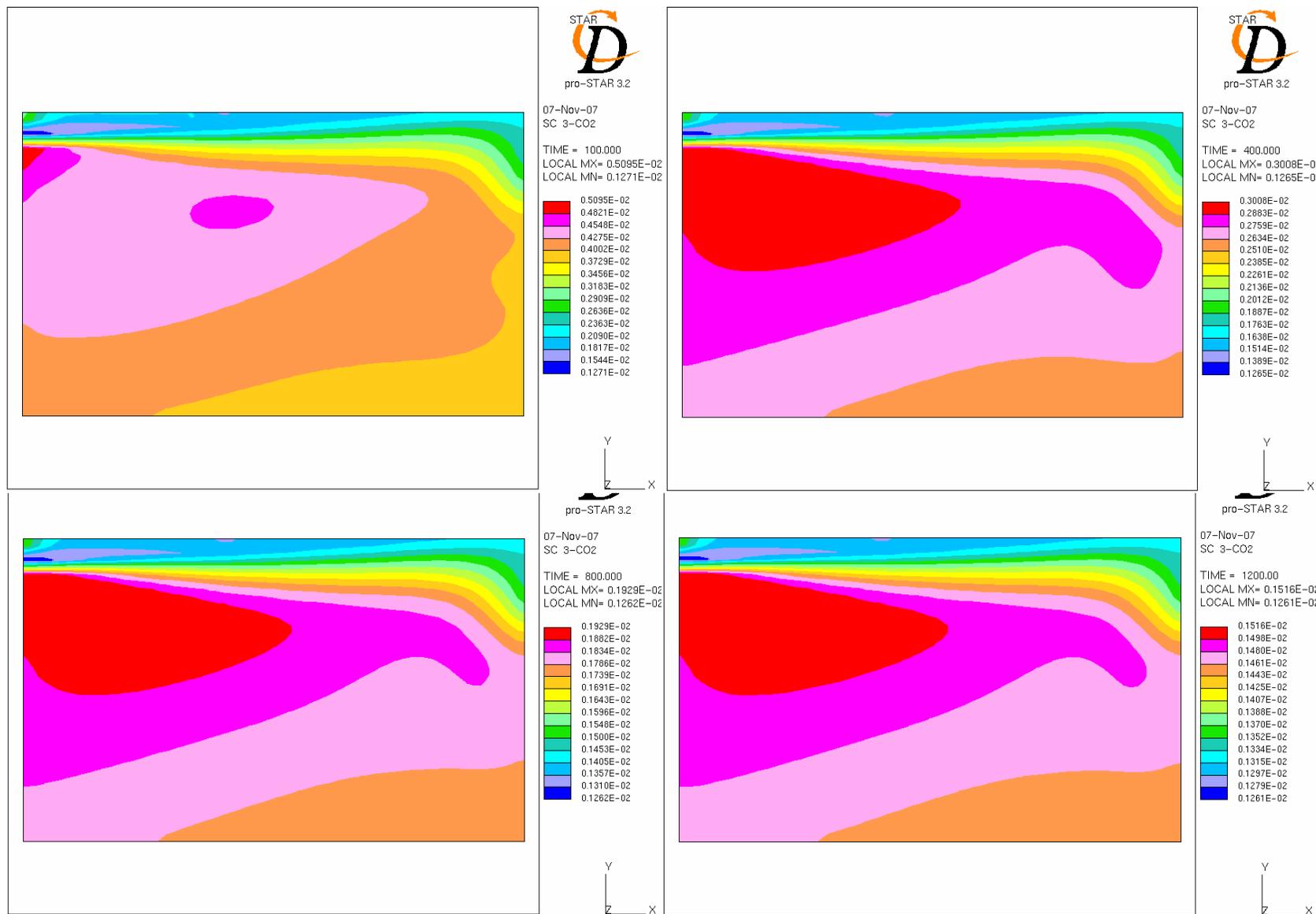


圖 6-14 Case 1-1-12ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

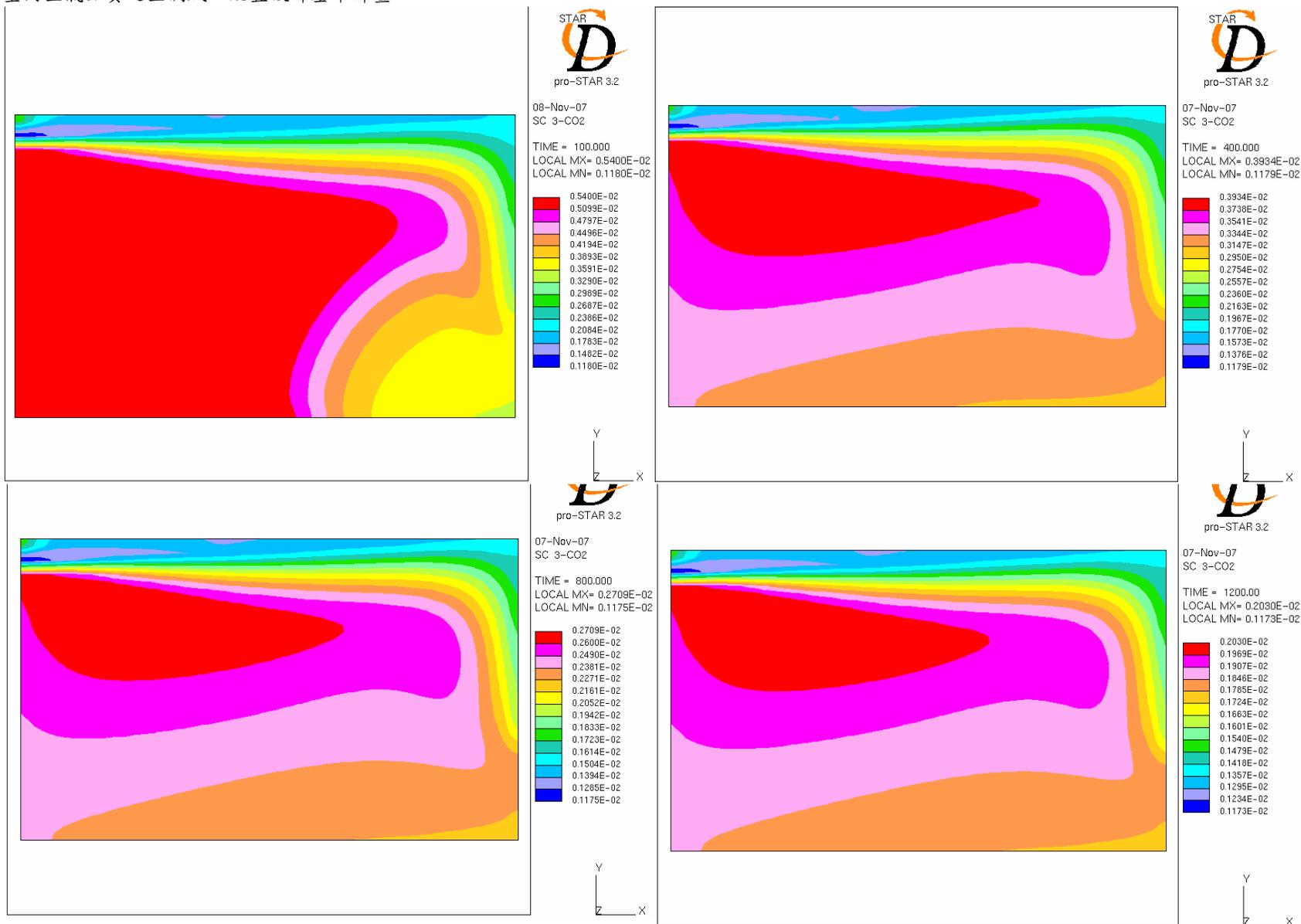


圖 6-15 Case 1-2-6ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

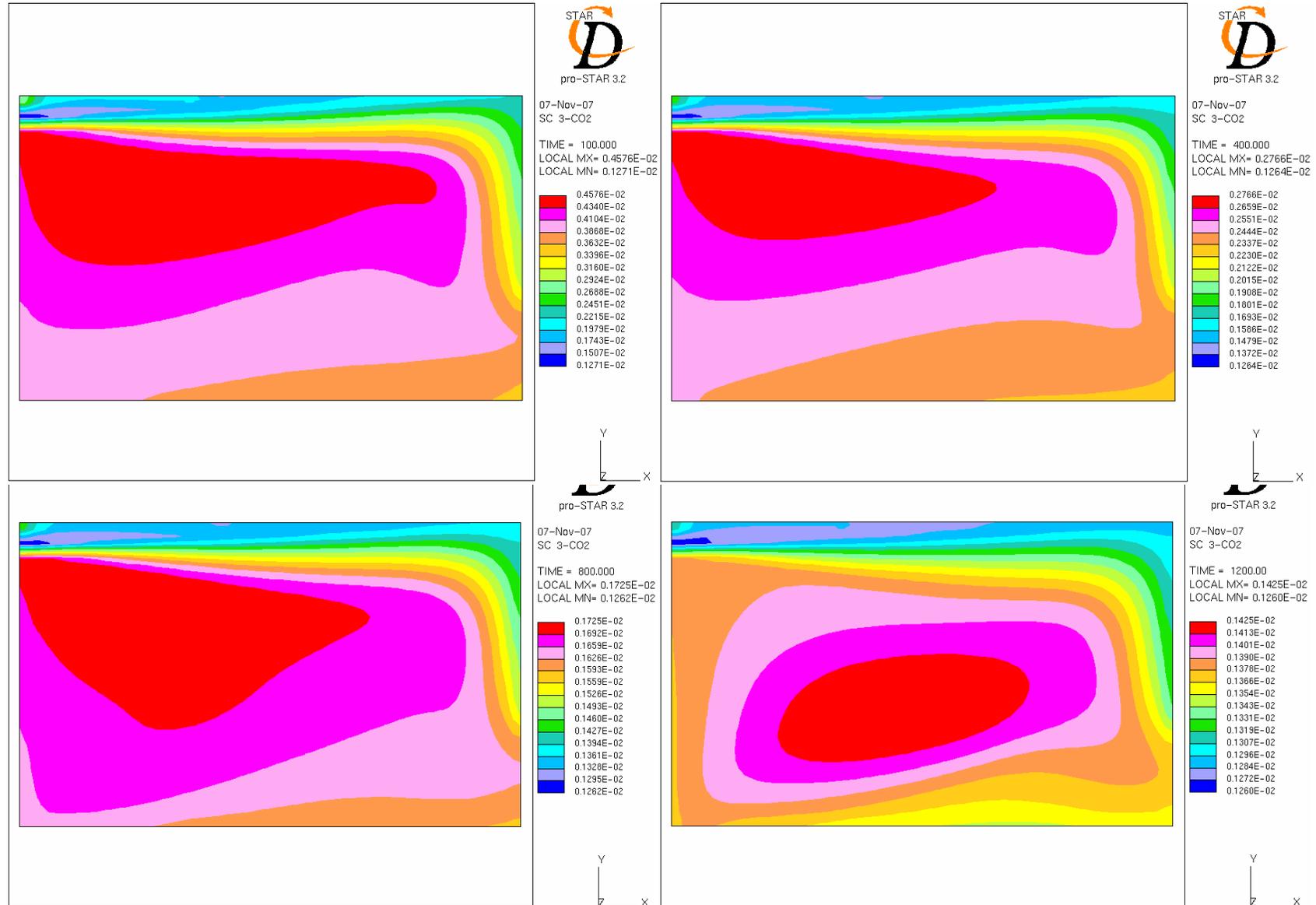


圖 6-16 Case 1-2-12ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

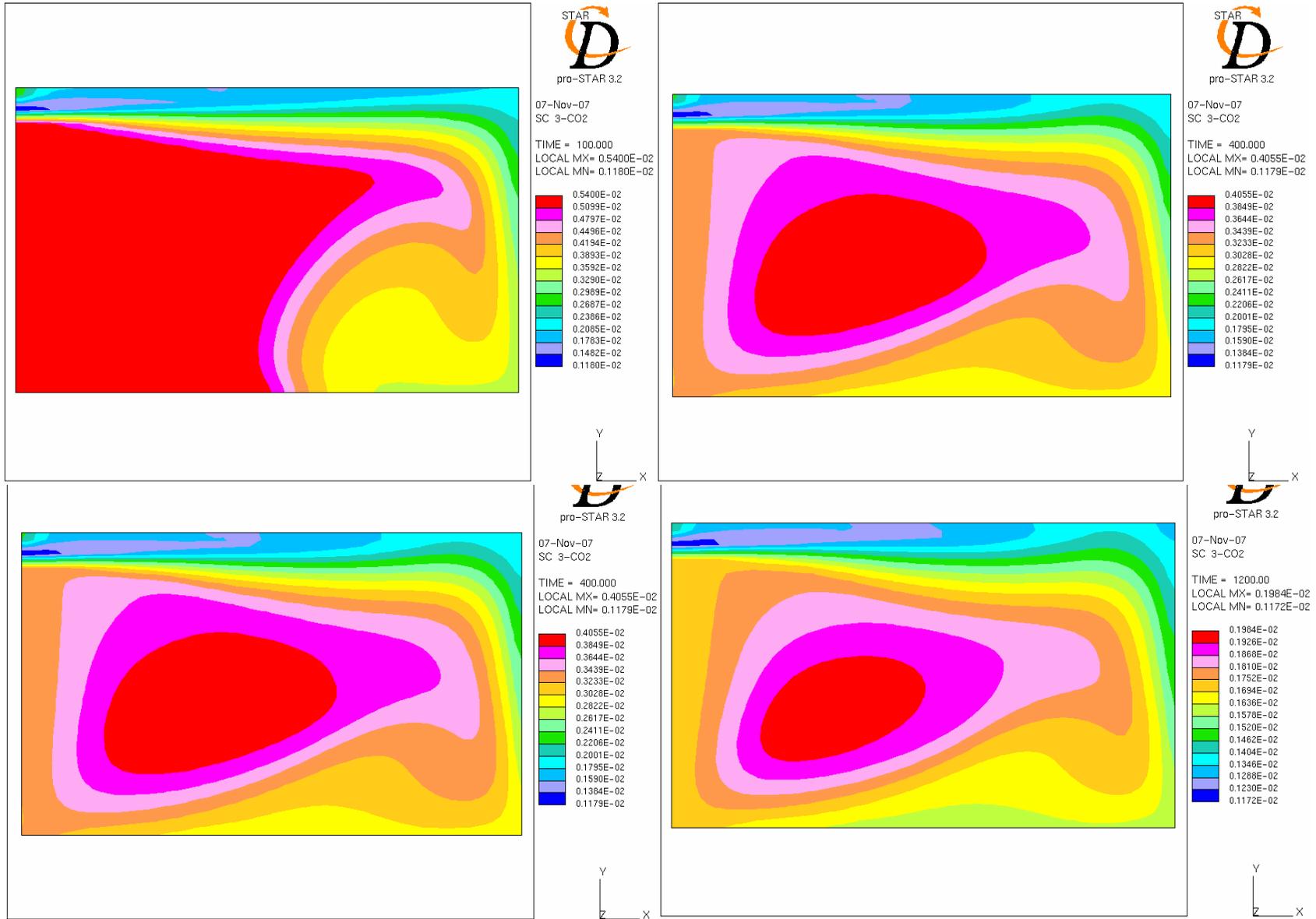


圖 6-17 Case 1-3-6ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

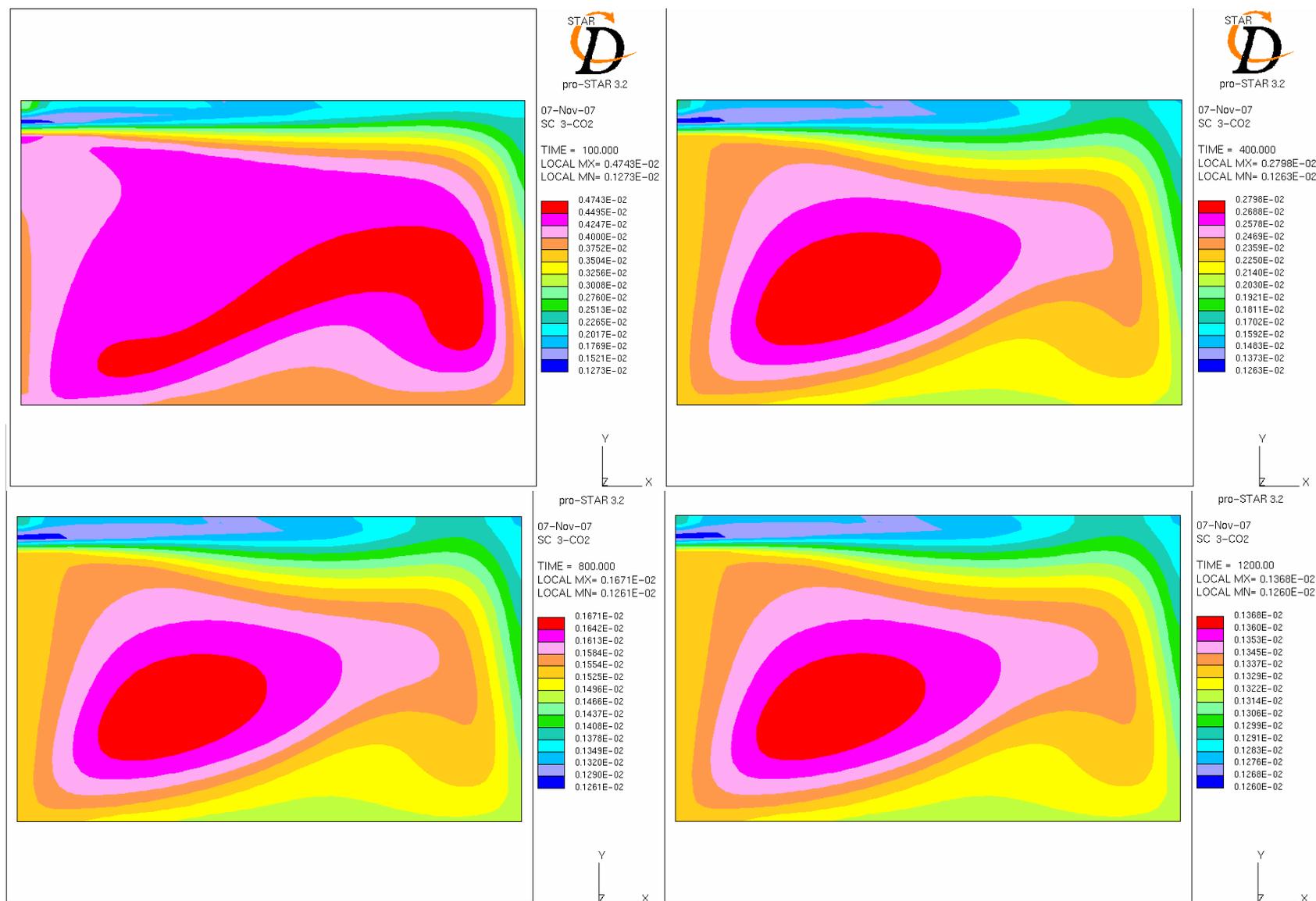


圖 6-18 Case 1-3-12ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

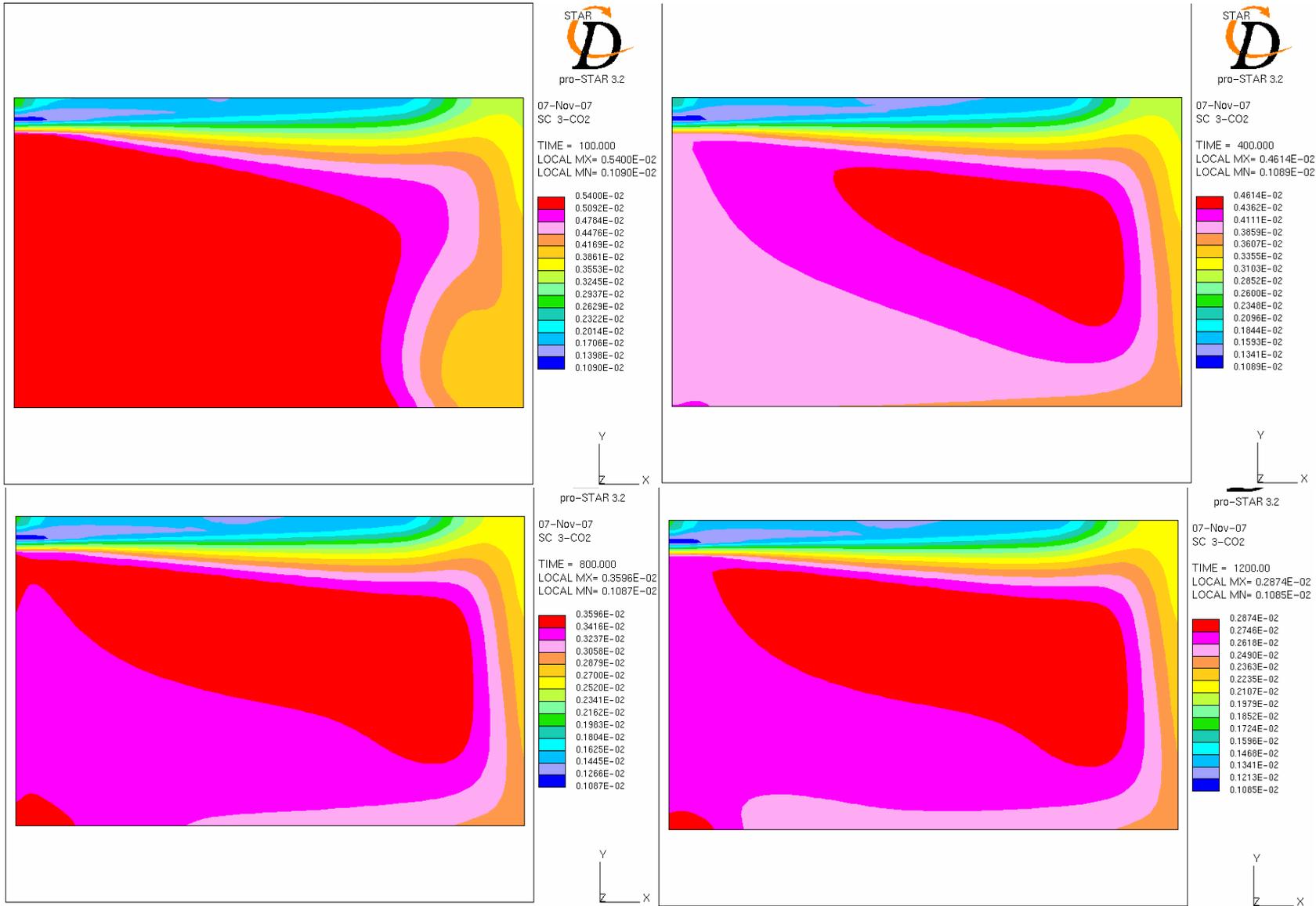


圖 6-19 Case 1-4-6ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

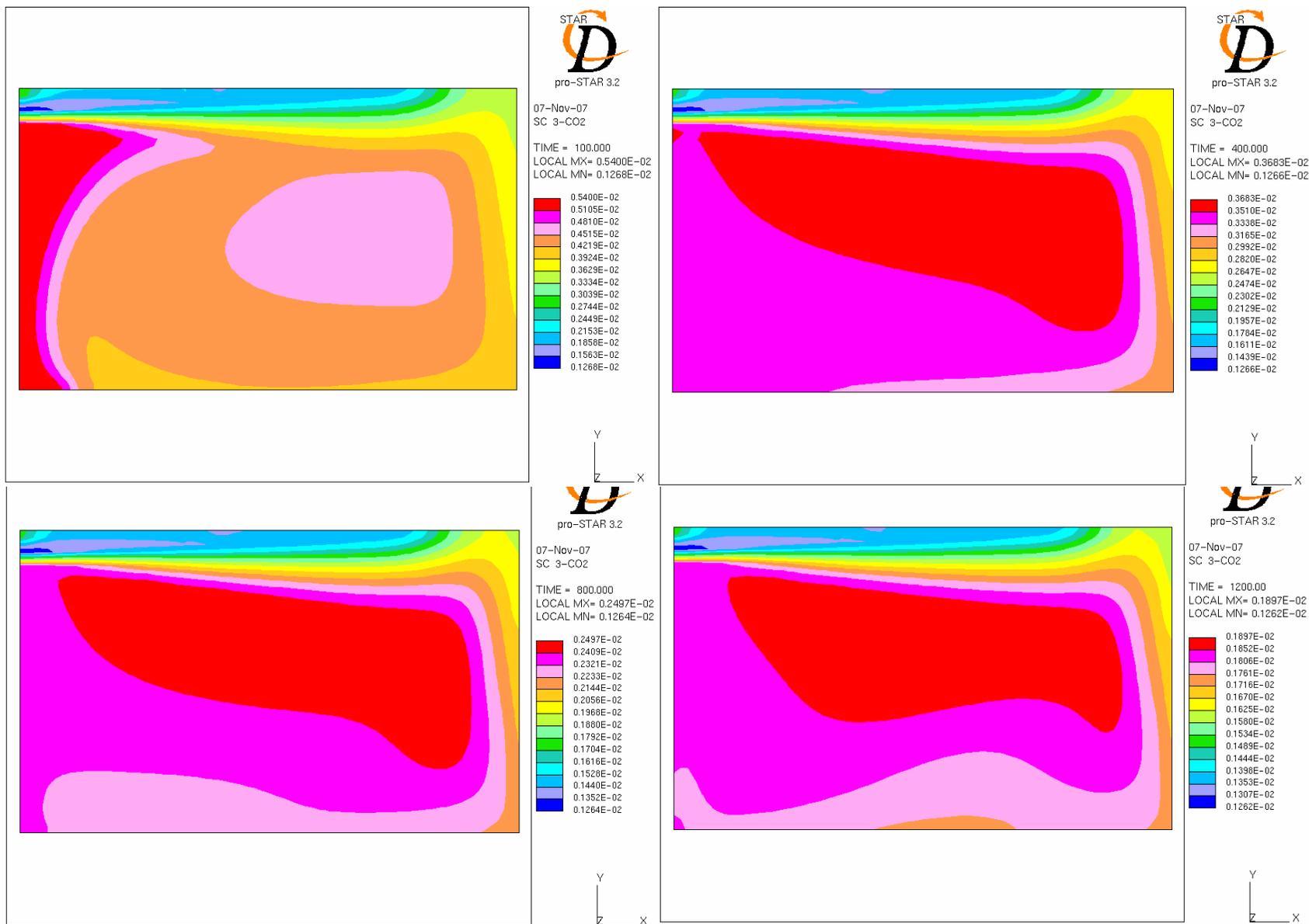


圖 6-20 Case 1-4-12ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

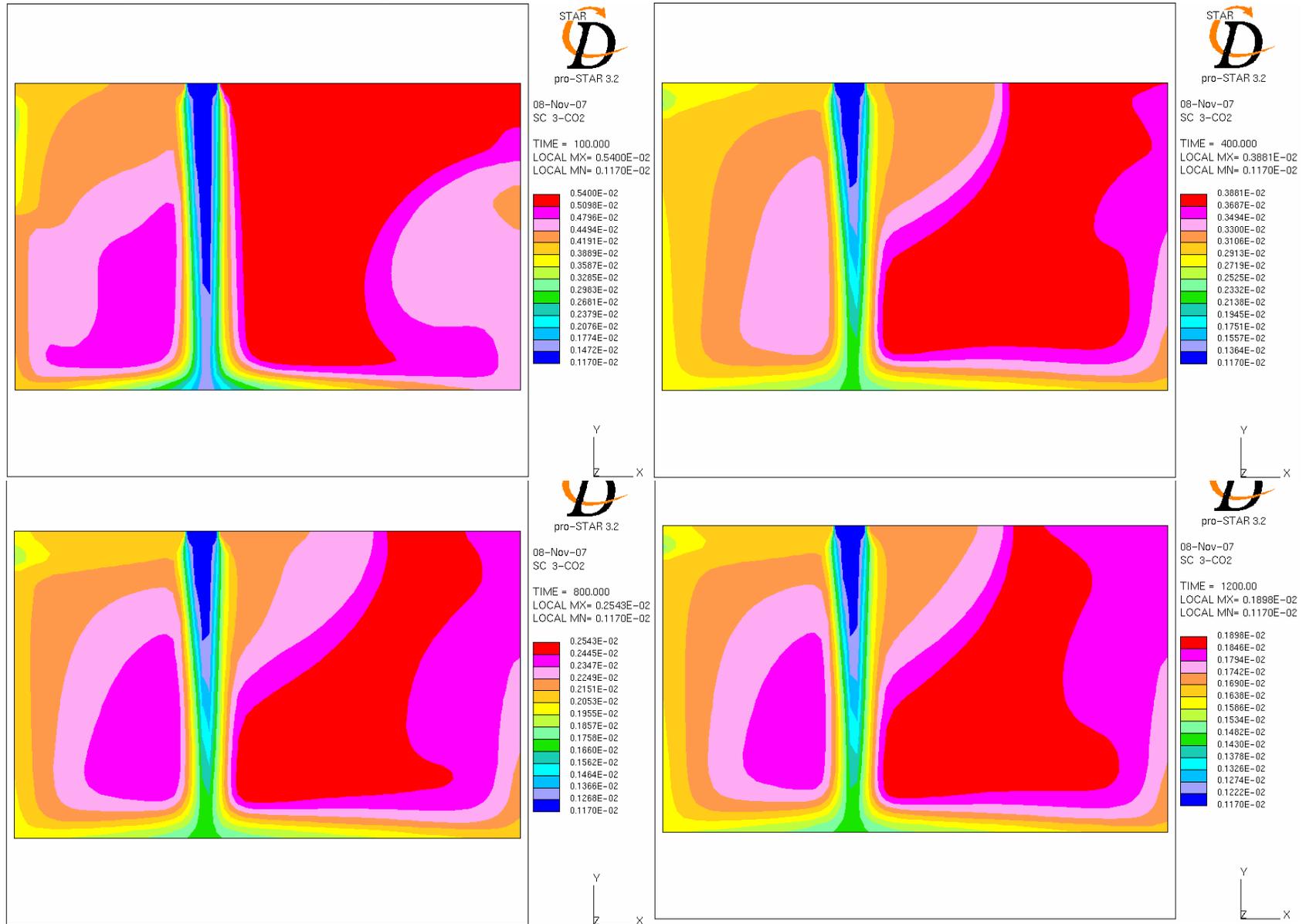


圖 6-21 Case 2-1-6ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

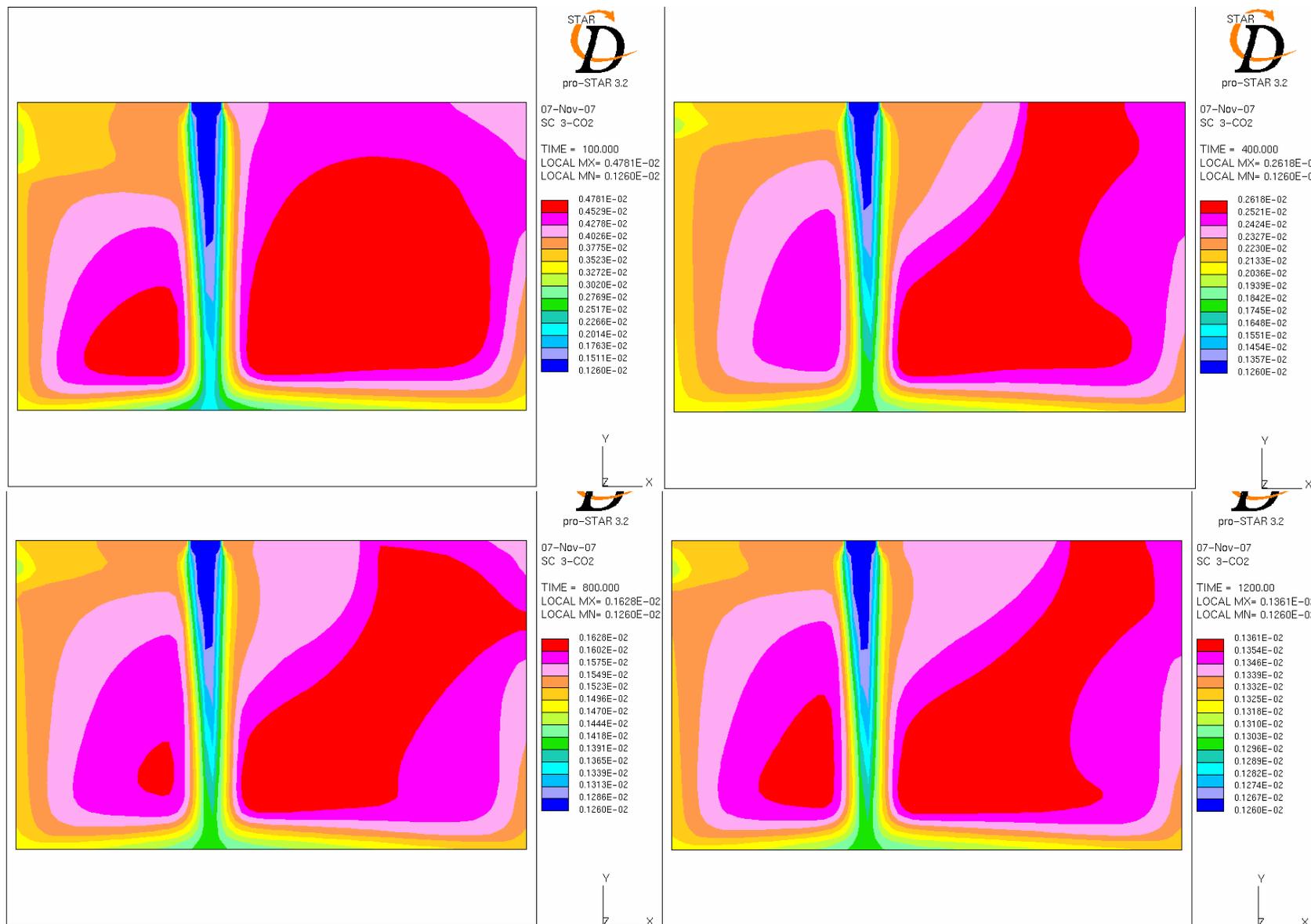


圖 6-22 Case 2-1-12ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

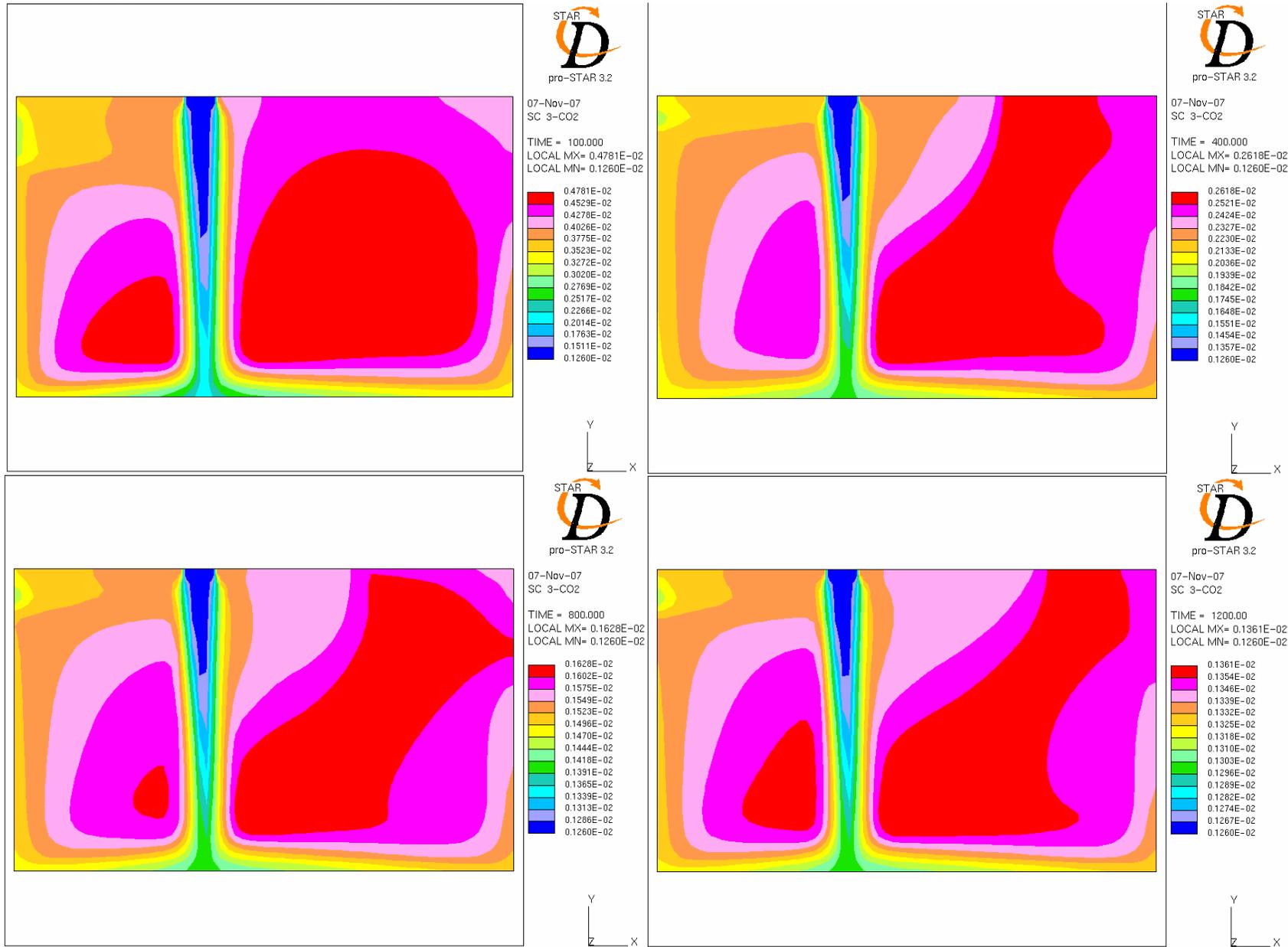


圖 6-22 Case 2-1-12ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

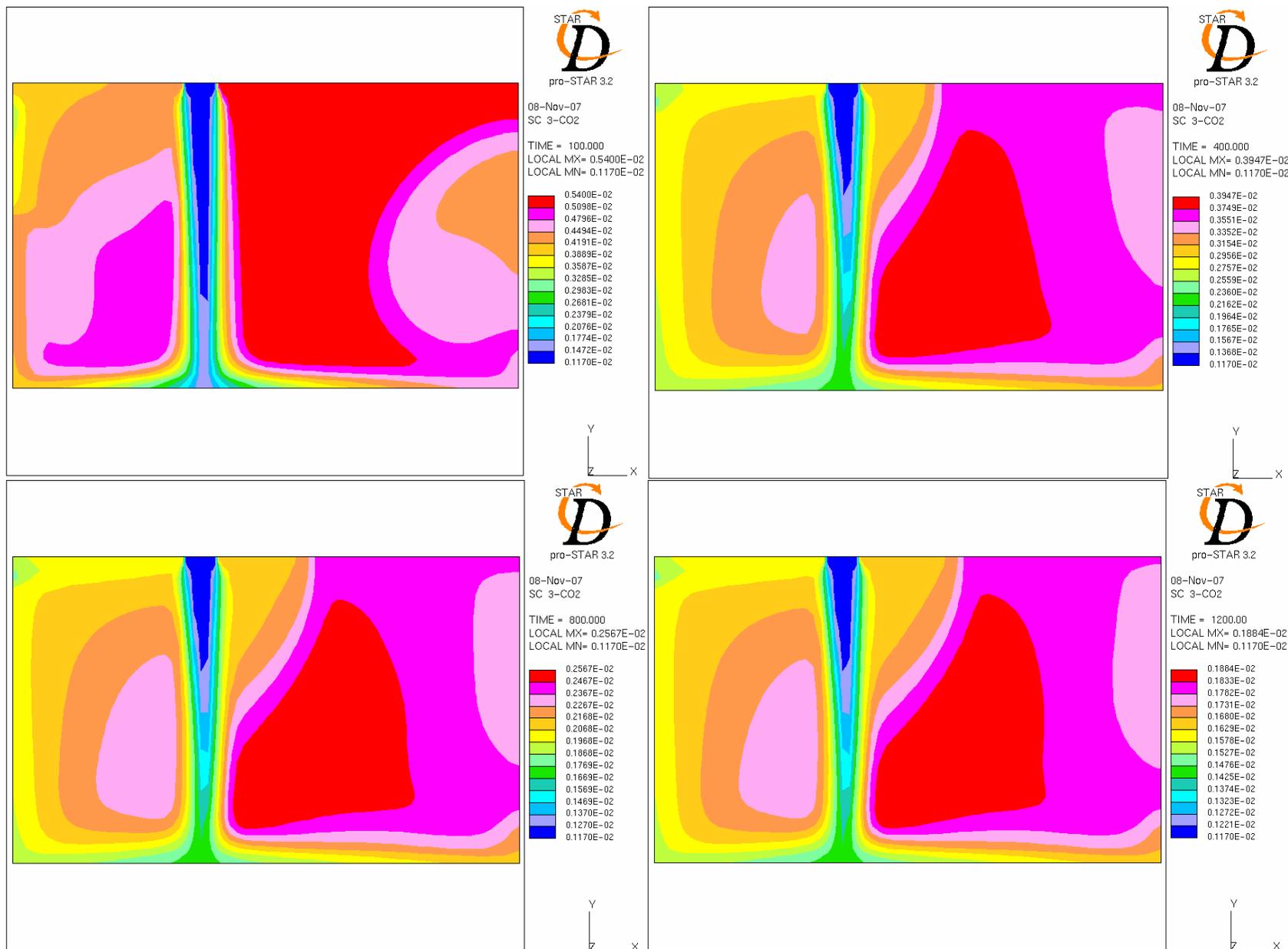


圖 6-23 Case 2-2-6ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

提升室內空氣品質之空調風口配置設計基準計畫

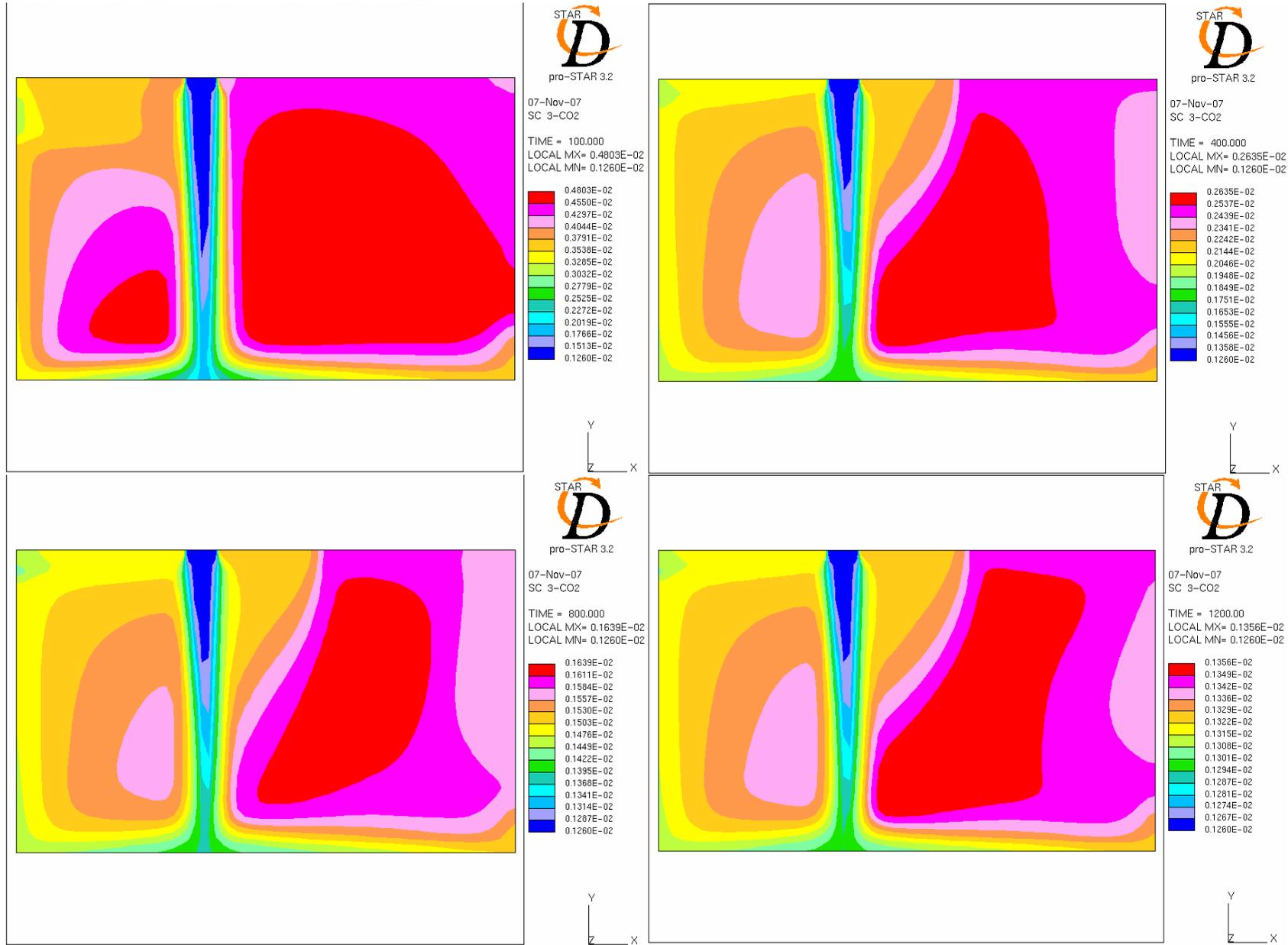


圖 6-24 Case 2-2-12ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

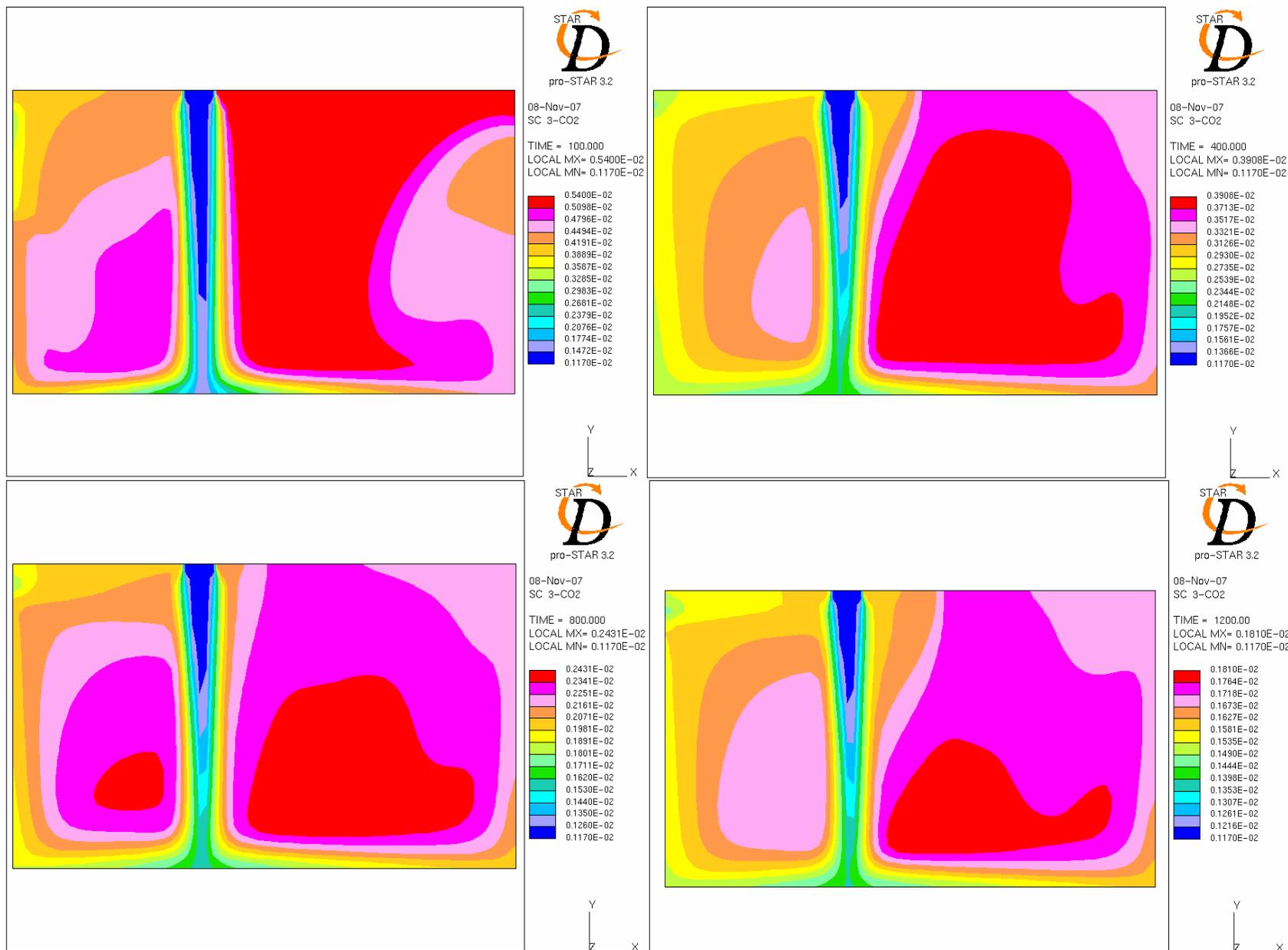


圖 6-25 Case 2-3-6ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

提升室內空氣品質之空調風口配置設計基準計畫

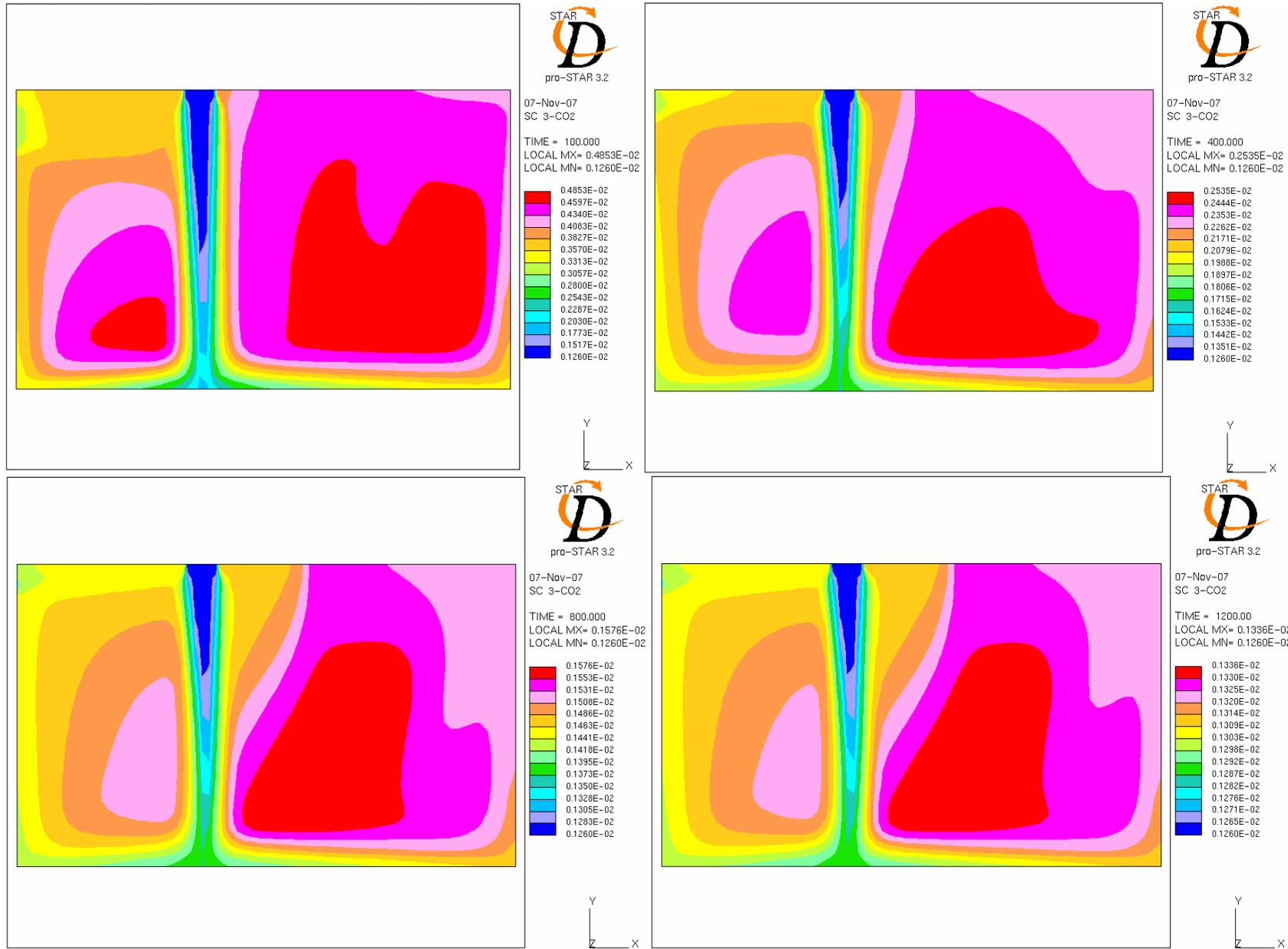


圖 6-26 Case 2-3-12ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

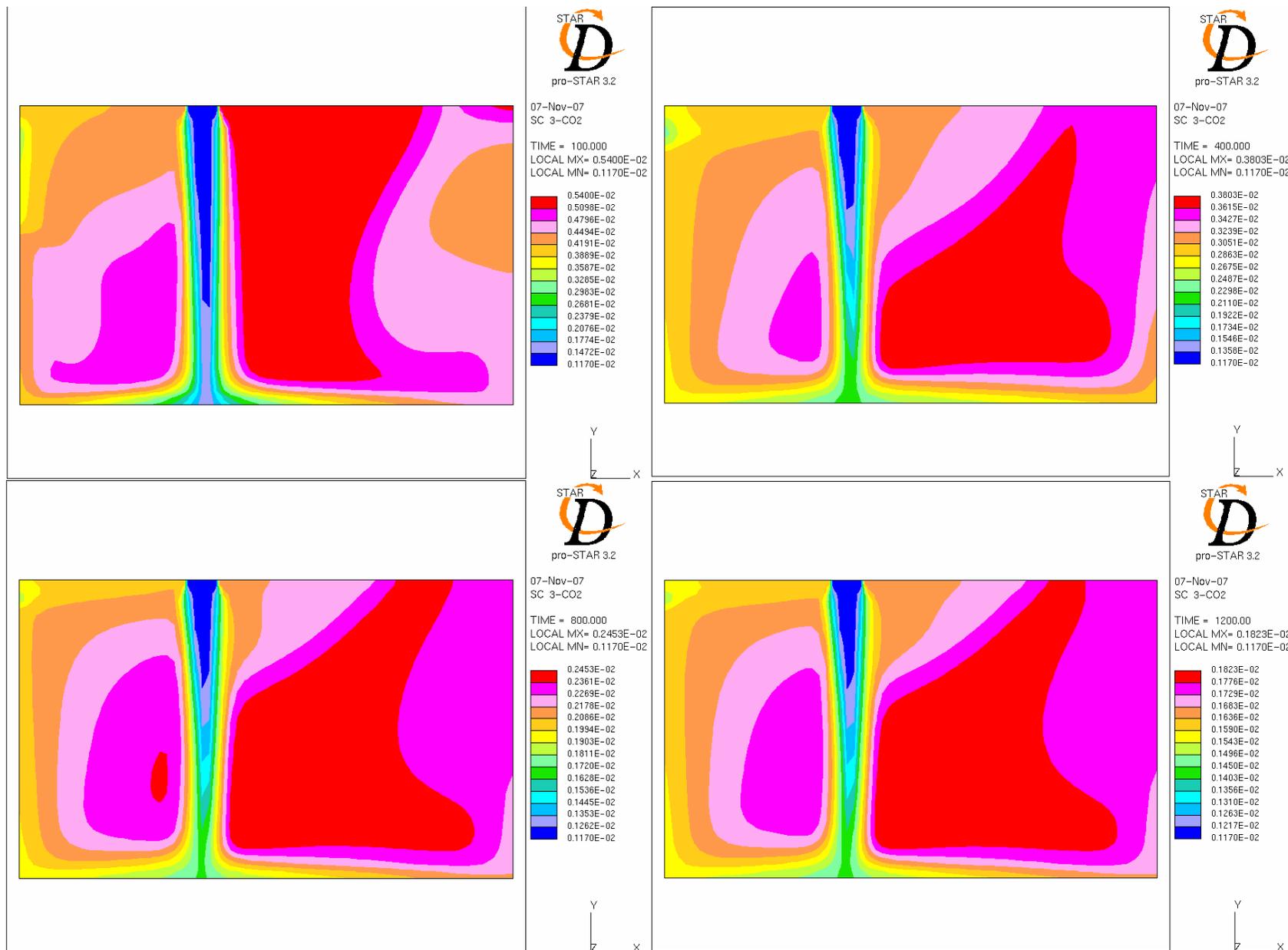


圖 6-27 Case 2-4-6ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

提升室內空氣品質之空調風口配置設計基準計畫

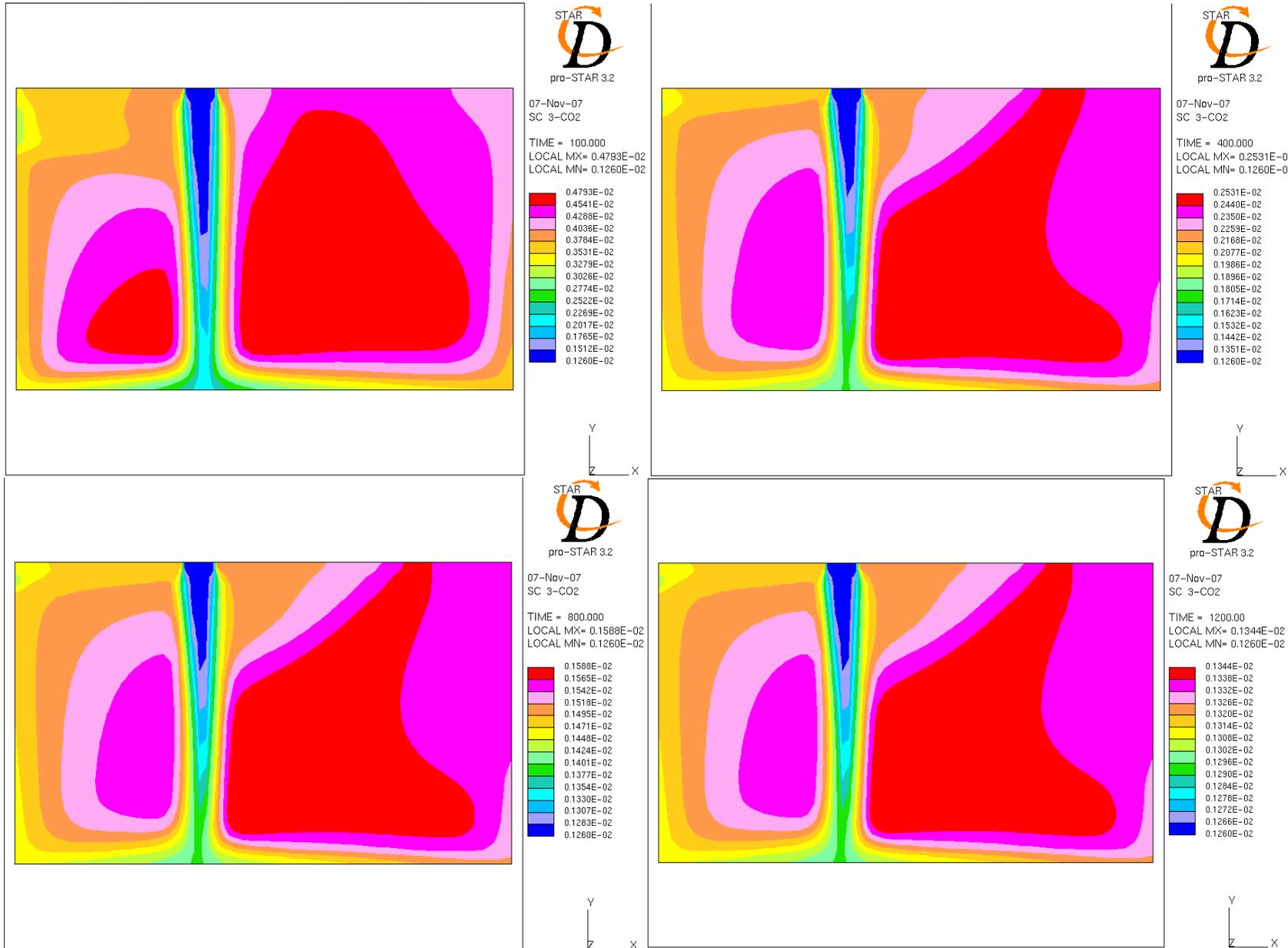


圖 6-28 Case 2-4-12ACH 100~1200 秒空間之 CO2 濃度分佈情形 (Z=1.25M 截面)

6.3 室內空調通風污染物移除效率與分布模擬與實驗之比較

不同室內空調風口配置與通風換氣率對污染物移除效率影響之模擬值與實驗結果之比較如表 6-2 所示。表 6-2 顯示模擬結果皆較實驗結果之通風效率來的更好，主要因為實驗之通風效率會受氣密的影響，但無論是模擬與實驗結果都呈現進風口 2 出風口 1 之風口配置情形其通風效率最佳，而且當通風量增加為兩倍時，模擬與實驗皆呈現室內通風效率均會提升，尤其原本通風效率較好的風口配置，當通風量增加時其通風效率會有較顯著的提升。

實驗與模擬結果也都顯示進氣口位置 1 與排氣口編號 1、2 之配置時，由於氣流可以較直接方式流出，當通風量增加為兩倍時通風效率提升較少，主要是氣流停留在室內時間較短，相對而言其整體換氣效率提升較不顯著。

表 6-2 實驗與模擬各種案例之通風效率比較

案例編號(實驗)	通風效率 (%)	案例編號(模擬)	通風效率 (%)
1-1-6ACH	19.51	1-1-6ACH	36.44
1-2-6ACH	19.84	1-2-6ACH	38.28
1-1-12ACH	26.77	1-1-12ACH	46.92
1-2-12ACH	35.27	1-2-12ACH	53.26
2-1-6ACH	27.21	2-1-6ACH	44.87
2-2-6ACH	22.01	2-2-6ACH	43.63
2-1-12ACH	40.17	2-1-12ACH	64.06
2-2-12ACH	36.34	2-2-12ACH	58.67

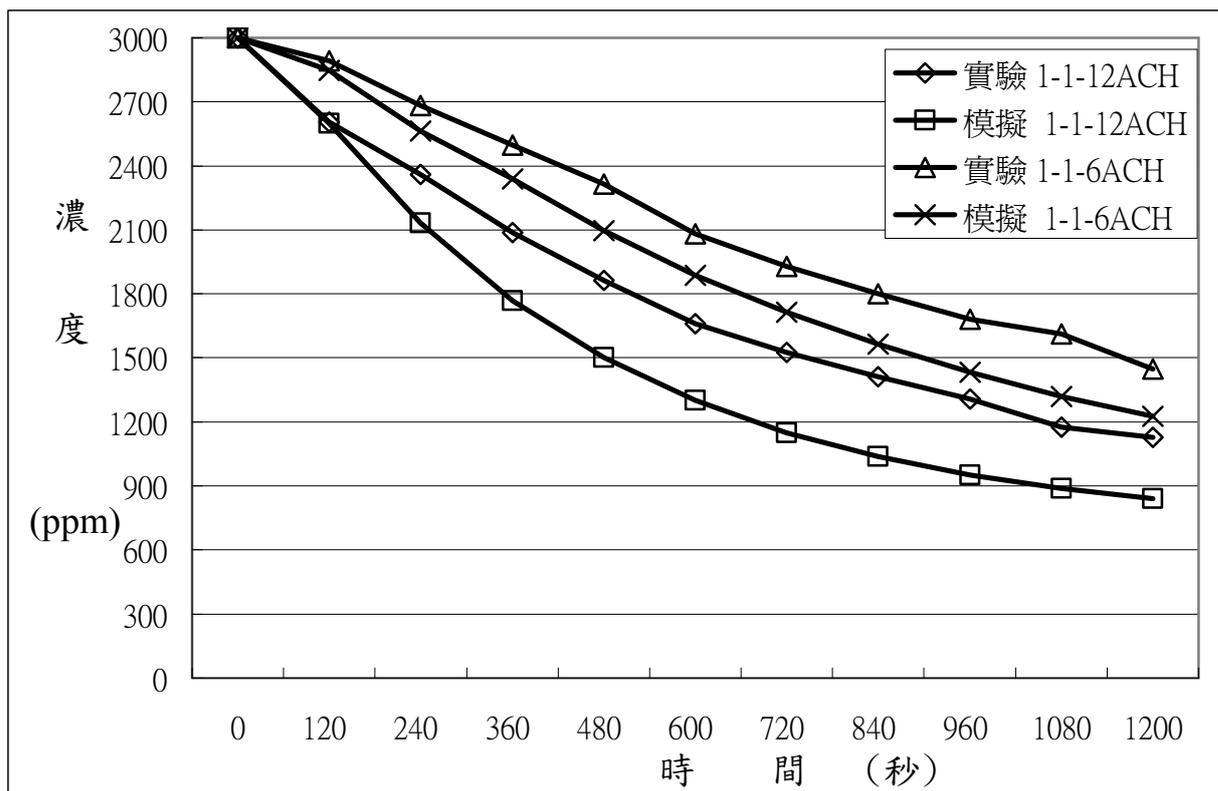


圖 6-29 進、回風口 1-1-6ACH、12ACH 實驗與模擬之空間平均濃度衰減曲線

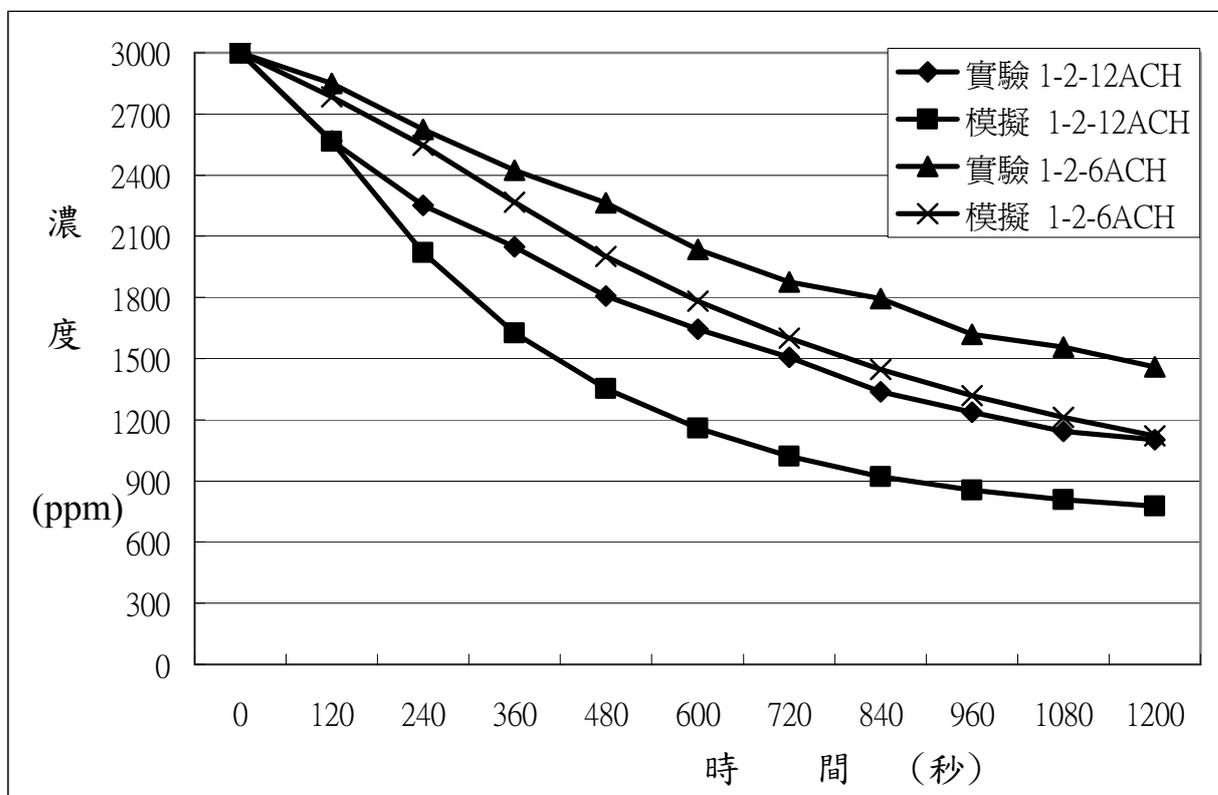


圖 6-30 進、回風口 1-2-6ACH、12ACH 實驗與模擬之空間平均濃度衰減曲線

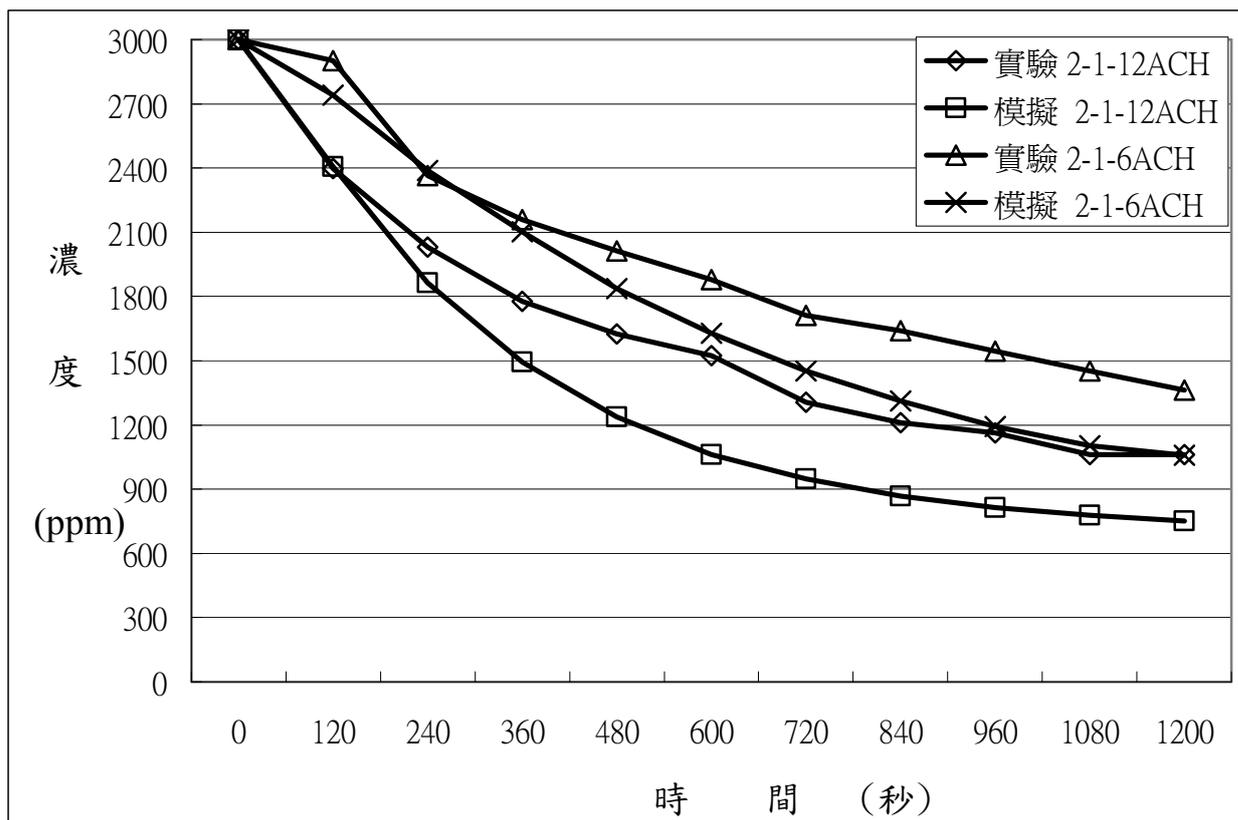


圖 6-31 進、回風口 2-1-6ACH、12ACH 實驗與模擬之空間平均濃度衰減曲線

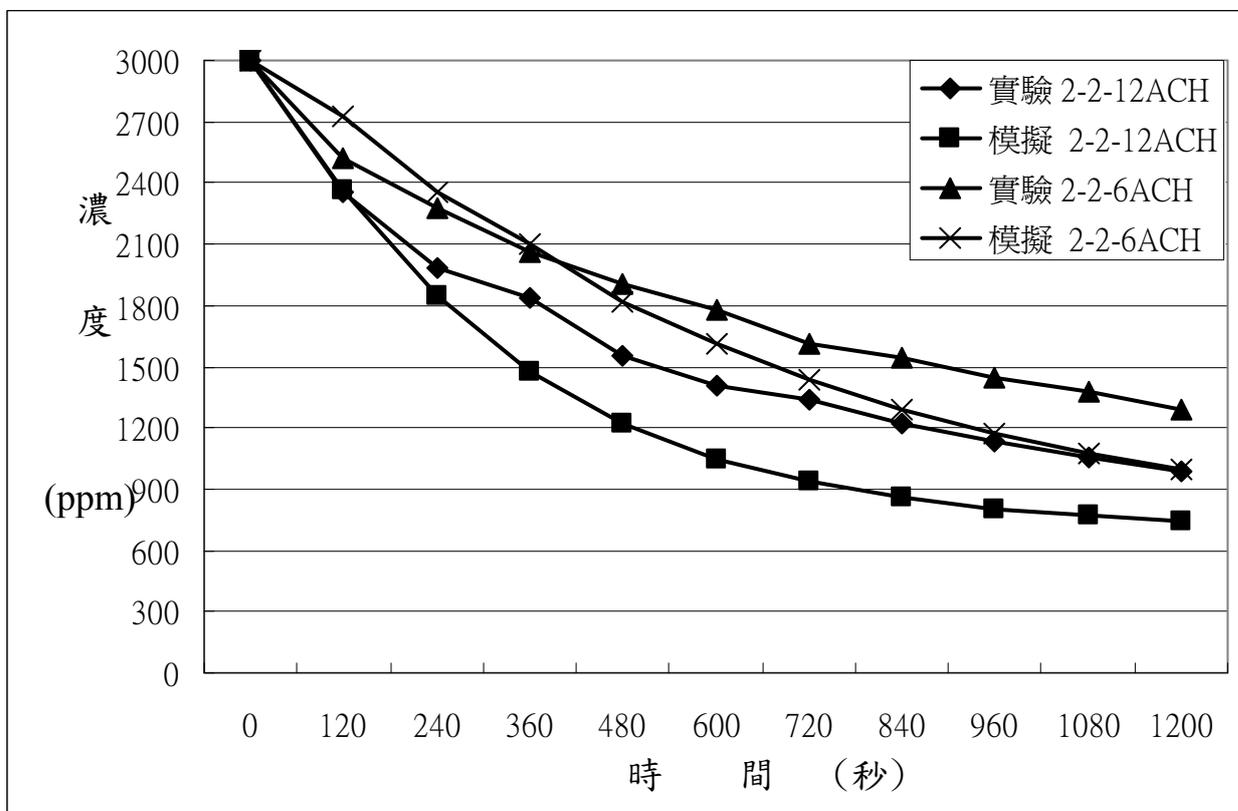


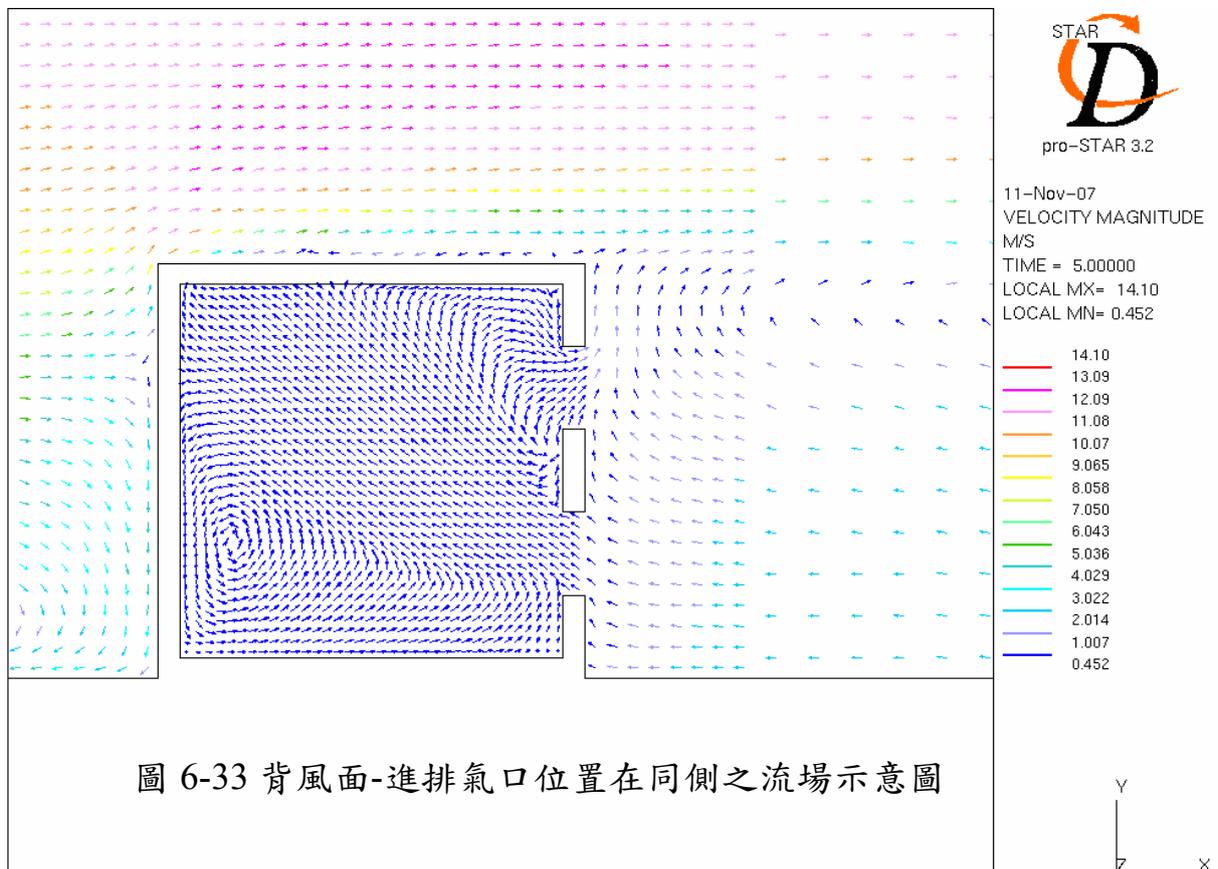
圖 6-32 進、回風口 2-2-6ACH、12ACH 實驗與模擬之空間平均濃度衰減曲線

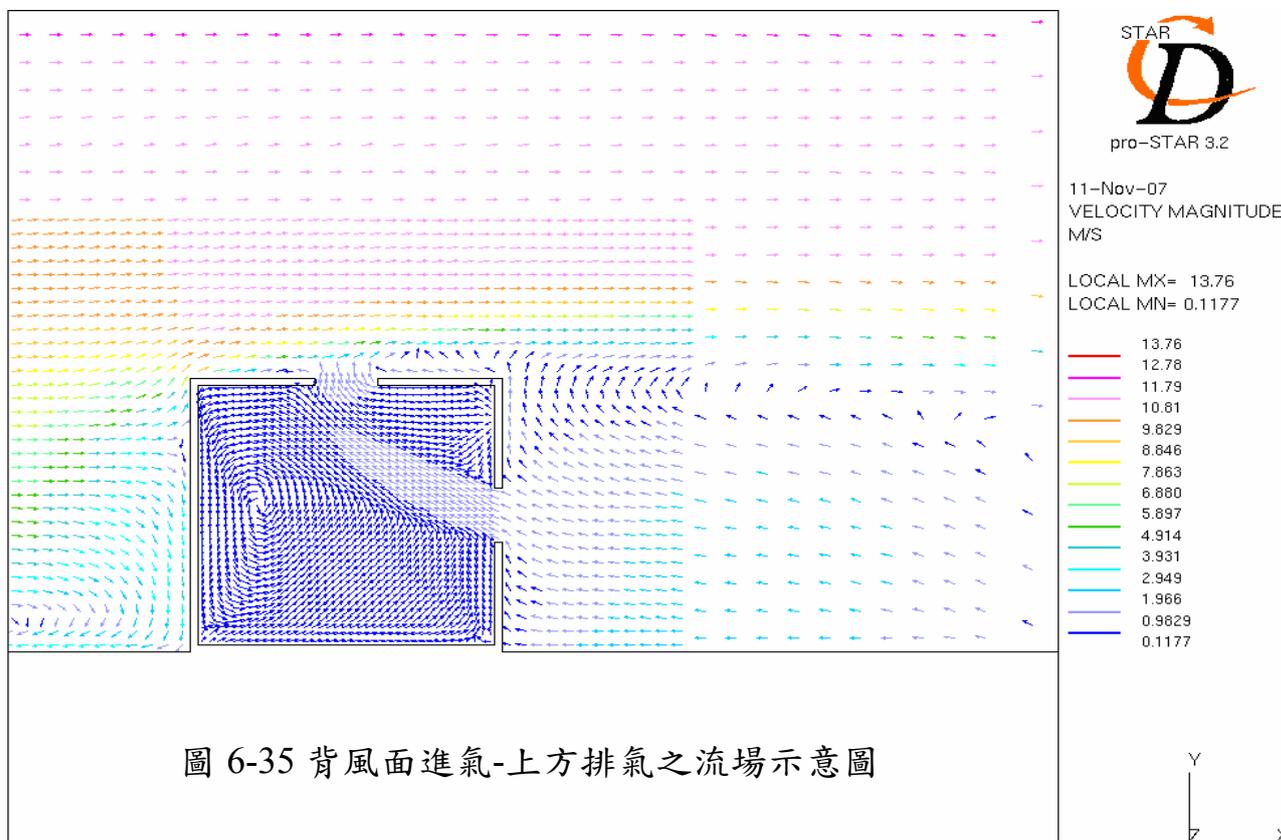
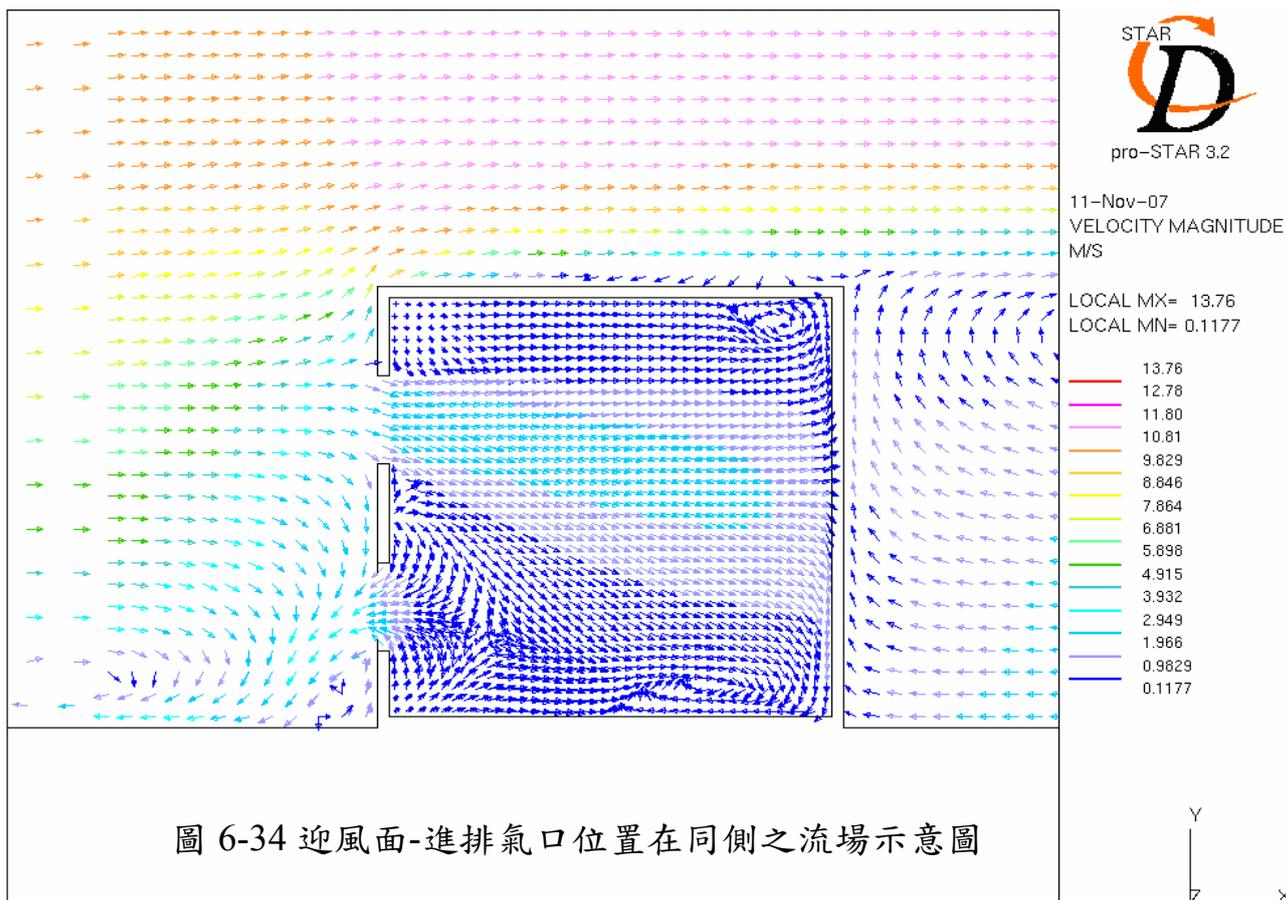
6.4 外風場對空調風口對外開口影響之模擬

圖 6-33 至圖 6-35 顯示外風場對空調風口對外開口影響之模擬。分別考量風口位置於迎風面或背風，及排氣口於屋頂，進氣口於背風面等狀況。圖 6-33 顯示進排氣口於同側背風面狀況，由其氣流狀況顯示若進氣口位置過低，外風場形成之渦流有可能會將地面之汙濁空氣帶至進氣口附近，而藉由進氣口進入室內。

圖 6-34 顯示進排氣口於同側迎風面狀況，由其氣流狀況顯示，若進排氣口位置過近，且進氣口低於排氣口，則外風場氣流可能將排氣口排出之汙濁空氣帶至進氣口附近，而藉由進氣口進入室內。

圖 6-35 顯示進氣口背風面、排氣口於屋頂狀況，由其氣流狀況顯示，若進排氣口垂直位置過近，則外風場氣流可能將排氣口排出之汙濁空氣帶至進氣口附近，而藉由進氣口進入室內。





第七章 結論及建議

7.1 結論

本計畫目的主要探討提升室內空氣品質之空調風口應有配置之建議要求，藉由計算流體力學模擬技術進行不同通風模式室內空氣品質電腦數值模擬分析，模擬所得結果將依據所完成之室內空氣品質評估指標，找出最佳通風模式策略。模擬結果透過全尺寸實驗進行比較分析與驗證。經由此風口配置對室內空氣品質影響之分析模式可以很迅速的判對空調通風口適當之配置位置。

本研究計劃已完成工作總結如下：

- (1) 針對室內空氣品質之影響因子其來源與特性進行分析、探討。
- (2) 完成室內空間內整體換氣空氣品質數學模式、舒適度預測模式及室內空間之空氣污染物移除模式等室內環境品質評估指標，以作為數值模擬分析與全尺寸實驗室之實驗驗證，評估最佳空調通風模式策略之依據與基準。
- (3) 完成國內外對於空調通風風口設置相關之規範與限制之收集與分析。
- (4) 完成不同空調風口配置與進氣量下之室內空氣品質電腦數值分析模擬模型建立及分析。
- (5) 完成不同空調風口配置對室內空氣品質影響之全尺寸實驗，並將實驗結果與模擬結果進行比較確認模擬之可靠度。
- (6) 完成外風場對於空調風口對外開口影響之模擬分析。

本研究發現要維持或是改善建築物室內之空氣品質，除本身建築物建材與裝修及傢俱須注意慎選外，建築物本身之空氣調節與通風設備扮演重要角色，而目前國內環保署正積極推動室

內空氣品質法進行建築空間內空氣品質之要求，以確保建築物內人員之健康。然而目前建築相關法規對於空氣調節與通風設備等之設計或設計之要求僅止於通風量（建築技術規則建築設計篇第 102 條），依據建築物之用途使用空間規定最小之通風量。

由本計劃研究結果可以發現無論是全尺寸實驗或是數值模擬，建築物室內空氣品質除了受到外氣通風量大小影響外（換氣次數），空調通風口之相對配置位置所形成之氣流路徑對室內空氣品質影響更為顯著，因此進行建築物之空調通風系統設計或配置，除了法規所要求之通風量外風口設置之位置，還需考慮其適當之風口設計位置。

除了建築物室內之空調風口配置外，本研究亦發現若建築物空調風口對外開口設置位置不當，亦有可能直接將室外之汙濁空氣帶入或是將原先排出之廢待再次吸入造成二次污染。

7.2 建議

◆ 中長期可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

建議內容：

建議內容：

為確實提昇建築物室內空氣品質，確保國人健康，建築物內之空氣調節與通風設備設置除法規要求之通風量外，建議應導入污染物移除效率作為室內空氣品質評估指標，同時應對於相關從業人員（建築設計人員、空調設計人員、室內裝修人員等）宣導或教育訓練，適當空調風口配置對於室內空氣品質影響之關係與重要性。

參考文獻

1. ASHRAE. 2001. ANSI/ASHRAE STANDARD 62-2001, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
2. NIOSH. 1989. Congressional testimony of J. Donald Millar, M.D., Director, before the Subcommittee on Superfund, Ocean and Water Protection, Committee on Environment and Public Works, U.S. Senat.
3. ASHRAE. 2007. ASHRAE Handbook – HVAC Application, Control of Gaseous Indoor Air Contaminants. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers, Inc
4. Meckler, M. and R.M. Plettner. 1988. IAQ '88: Engineering Solutions to Indoor Air Problems, Use of Air Cleaners to Reduce Outdoor Air Requirements , Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers, Inc. pp. 130-147
5. Nazaroff, W.W. and G. R. Cass. 1986. Mathematical modeling of chemically reactive pollutanta in indoor air, Environmental Science and Technology, Vol.20, pp. 924-934.
6. Sparks, L.E. 1988. Indoor Air Quality Model, Version 1.0, EPA-60018-88097a U.S. Environment Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
7. M.Maroni et al.,1995. Indoor Air Quality, pp. 443-444.
8. Richard A. Wadden and Peter, A. Scheff, 1982, Indoor Air Pollution, pp.105-107.
9. West,M.K. and Hansen, E.C. 1989. Effect of hygroscopic materials on indoor relative humidity and air quality, Proceedings of ASHRAE, Conference IAQ'89, San Diego,CA., pp. 56-59.
10. Kusuda,T. 1983. Indoor humidity calculations, ASHRAE Transactions, pp728-740.
11. Miller, J.D.,1984. Development and validation of a moisture mass balancemodelfor predicting residential cooling consumption energy, ASHRAE Transactions,Vol.90,Part 2B, pp. 275-293.
12. William A. Burgess et al. 1989, Ventilation for Control of the Work Environment ,pp. 440-443.
13. Heiselberg, P. 1996. Room air and contaminant distribution in mixing room, ASHRAE Transactions : Symposia, Vol. 102, part 2, pp. 332-339.

14. 蔡益超,林宗賢.1984 建築物所受風力規範研擬. 國科會防災科技研究報告, NSC73-0414-P002-04.
15. 范祥宇. 1996 不同建築造型對地面風場之影響, 淡江大學水資源及環境工程學系碩士論文
16. B.S. Kandola, Effects of atmospheric wind on flows through natural convection roof vents Fire Technology, vol.26, pp.107-120, 1990.
17. G. Evola, and V. Popov, 2006. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings, Energy and buildings 38, pp. 491-501.
18. Y. Jiang, D. Alexander, H. Jenkins, R. Arthur and Q. Chen, 2003. Natural ventilation in buildings: measurements in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91, pp. 331-353.

附 錄 一

室內空氣品質建議值

中華民國 94 年 12 月 30 日行政院環境保護署環署空字第 0940106804 號

一、為改善及維護室內空氣品質，維護國民健康及生活環境，特訂定本建議值。

二、本建議值除勞工作業場所依室內空氣污染物濃度標準外，其他室內場所空氣污染物及濃度如下：

項 目	建 議 值	單 位	
二氧化碳 (CO ₂)	8 小時值	第 1 類 600 第 2 類 1000	ppm (體積濃度百萬分之一)
	一氧化碳 (CO)	8 小時值	
甲醛 (HCHO)		1 小時值	0.1
總揮發性有機物(TVOC)	1 小時值	3	Ppm (體積濃度百萬分之一)
細菌(Bacteria)	最高值	第 1 類 500 第 2 類 1000	CFU/m ³ (菌落數/立方公尺)
		真菌(Fungi)	
粒徑小於等於10微米 (μm) 之懸浮微粒 (PM ₁₀)	24小時值	第 1 類 60 第 2 類 150	μ g/m ³ (微克/立方公尺)
		粒徑小於等於2.5微米 (μm) 之懸浮微粒 (PM _{2.5})	
臭氧 (O ₃)	8小時值	第 1 類 0.03 第 2 類 0.05	ppm (體積濃度百萬分之一)
		溫度(Temperature)	

三、本建議值之各項意義如下：

- (一) 1小時值：指1小時內各測值之算術平均值或1小時累計採樣之測值。
- (二) 8小時值：指連續8個小時各測值之算術平均值或 8 小時累計採樣測值。
- (三) 24 小時值：指 連續 24 小時各測值之算術平均值或 24 小時累計採樣測值。
- (四) 最高值：依檢測方法所規範採樣方法之採樣分析值。

四、本建議值所稱第1類及第2類適用場所如下：

- (一) 第1類：指對室內空氣品質有特別需求場所，包括學校及教育場所、兒童遊樂場所、醫療場所、老人或殘障照護場所等。
- (二) 第2類：指一般大眾聚集的公共場所及辦公大樓，包括營業商場、交易市場、展覽場所、辦公大樓、地下街、大眾運輸工具及車站等室內場所。

五、中央各目的事業主管機關及地方政府為改善室內空氣品質得另訂較嚴格之標準值。