

嘉南藥理大學114年度 研究計畫成果報告

校內專題研究整合型計畫

總計畫名稱：空調建築之通風效能與火災避難策略評估

子計畫名稱：空調作業環境之通風換氣最佳化探討

個人型產學合作研究計畫

計畫名稱：

執行期間：114年06月09日至114年12月31日

總計畫主持人：黃小林教授

本（子）計畫主持人：黃小林教授

本（子）計畫協同主持人：賴振立教授

參與研究人員：許佳慧

中華民國115年2月21日

摘要

由於室內作業場所普遍使用無外氣引入功能之冷氣來調節溫、濕度，且為節能將門窗緊閉，而忽略室內空氣持續內循環導致空氣品質不良而危害人體健康。有鑑於工作人員長時間處於室內外換氣不足的空調環境，因此本研究針對使用空氣循環的冷氣場所，探討並提出有效的通風改善方法，以確保室內空氣品質。

本研究選擇一個有開冷氣的狹長型作業場所作為研究對象，在不改變空間原有配置、結構及維持冷氣開啟之出回風循環的狀況下，來探討可行的通風改善方法。本研究使用計算流體力學(CFD)來模擬冷氣運轉下，室內固定人數及各種通風模式(空調直接引入外氣、開門、設置立扇、安裝進排風扇)下之二氧化碳分布，並以二氧化碳濃度作為通風換氣良窳的指標，最後提出可行之維持良好室內空氣品質的通風方法。

結果顯示具有改善狹長型空間且使用內循環空調之室內外換氣效果的通風模式為：(1)空調引進新鮮外氣、(2)開啟大門(自然風速要足夠)、(3)開啟大門(自然風速要足夠)且設置立扇、(4)開門或關門設置六組進排風扇。開門進行自然通風雖具有引入外氣促進換氣，但其缺點在於難以掌控外氣風速及換氣量。雖然室內設置立扇可促使空氣流動無停滯感，但並無外氣引入能力，因此仍需配合開門之自然通風才可降低二氧化碳濃度。使用機械通風之進排氣扇的風壓低，導引外氣於整個狹長室內空間的能力有限，建議加裝誘導風機協助將新鮮空氣送至室內各處。

單就技術觀點研究如何改善使用冷氣之狹長型空間的室內空氣品質，以冷氣機直接引進新鮮外氣並均勻分布於整個室內空間，為四種通風模式中最可行有效的通風換氣方法。

關鍵字：室內空氣品質、計算流體力學、通風、二氧化碳。

一、前言

1.1 研究背景

空氣品質與民眾生活密不可分，隨著生活品質的提昇，民眾重視職場室內環境品質(Indoor Environment Quality, IEQ)的意識逐漸提高，例如細懸浮微粒(Fine Particulate Matter, PM_{2.5})等相關危害報導、研究發展皆已成為民眾關注的趨勢；但隨著社會型態的改變，民眾大部分的時間幾乎待在室內，因此室內環境之空氣品質顯得更為重要。台灣經濟蓬勃發展，建築空間的需求也越來越大，過多的建築物也造成許多建築間的距離過短，大樓繁多使建築不易採取自然通風換氣，因此大量仰賴空調，而若未妥適設計、清潔保養空調系統，致使灰塵、微生物等蓄積於通風系統並再釋出，加上室內外換氣不足導致室內污染物不斷累積而影響室內空氣品質，將可能造成人體罹患病態大樓症候群(Sick Building Syndrome, SBS)、建築相關疾病(Building Related Illness, BRI)或癌症等健康危害(陳瑞鈴等人，2012；行政院環境部，2017)。

環境部近年研究顯示，造成室內空氣品質不佳的主要三項因素為(丘建宏，2010；沈世宏，2008)：(1)公共場所人員密度高、空調設備配置不當及通風量不足等，因此造成二氧化碳超標。(2)過度裝修且裝修後未確實有充足的通風，造成有機溶劑等危害性化學物品濃度增高。(3)台灣為高溫高濕國家，有助於細菌、真菌類微生物增長。國內、外雖已有相當多關於建築、室內空調系統之通風研究，但在實際配置室內空調時卻沒有對空間特性加以分析再做設計，因此造成許多場所室內環境之不舒適性、汙染物超標等危害，導致後續衍生需考慮進行工程改善等問題。

為了確保空氣品質、人體舒適性或是特殊空間(如負壓病房等)的通風排氣，利用計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)來掌握許多影響因子進行模擬分析，探討流場的分布狀況已相當廣泛，甚至針對影響通風因素的因子進行研究，如室內配置、進出口位置以及室內流場(溫度、壓力、風速)等，可提出有效改善通風方案。

許多建築因為在空調設計規劃過程中沒有加以分析室內流場的狀況，或後續變更了建築物使用類型，造成門窗開口位置、幾何形狀不適合當下的使用類別，因此有室內通風不良、空氣品質不佳的問題。若能在建築規劃的通風設計中，除了設計前調查基地位置、常年風向外，也加入CFD 模擬其各種門窗開口之自然通風或空調之機械通風等程序，就可減少在未來可能碰到因通風不良而造成室內舒適性不滿意、室內空氣品質不佳等問題。有鑑於國內作業場所多使用室內循環之空調系統(窗型冷氣、分離式冷氣、箱型冷氣、送風盤管單元中央空調系統等)，在室內外換氣不足的情形下易導致室內空氣品質惡化，嚴重影響室內作業人員健康。因此本研究以 CFD 模擬某使用天花板嵌入式冷氣之場所空間內之流場狀態，探討在不同室內活動人員數之二氧化碳濃度分佈，進而提出維持良好室內空氣品質之最佳化通風方式。

1.2 研究目的

由於室內作業場所普遍使用之冷氣功能旨在調整溫、濕度，其運轉氣流僅在做室內循環，在室內裝潢隔間多及室外通風換氣不足的情形下，室內作業人員密度高時，二氧化碳及細菌濃度偏高，進而對人員健康造成危害。因此本研究之目的乃選擇某一使用天花板嵌入式冷氣之作業場所室內空間為對象，並以二氧化碳作為室內空氣品質指標，使用計算流體力學模擬室內人員活動下，可行之維持良好室內空氣品質的通風方法，以提供使用類似類型冷氣的作業場所，作為職場室內空氣品質之維護管理之參考。

二、文獻回顧

2.1 建築通風

社會發達，為了供應都市人口眾多之需求，因此增建許多建築物或工廠等，使得都市環境內



建築過度密集，也導致利用自然換氣之通風效率有限或不易採用自然通風進行室內空氣置換。加上汽、機車使用量相對增加，造成嚴重環境污染，如都市空氣污染、水質汙染、土壤汙染等，其造成之危害不容小覷。因此政府為了保障人體健康，針對工廠之危害物質和室內場所空氣污染物的容許濃度以及所需通風換氣量，訂定許多法律規範加以限制，如建築技術規則建築設備編第五章第一節第101、102條之通風相關規定，係依房間用途訂定其所需之通風量，其中辦公室所需通風量為 $10\text{m}^3/\text{h}$ (營建署，2015)；職業安全衛生法是以有害物質種類、產生率來訂定所需通風量及暴露容許濃度；室內空氣品質管理法則是訂定九種室內常見空氣污染物之空氣品質標準。勞工與民眾所採用的法令也不同，如勞工之工作場所採用職業安全衛生法，民眾使用之公共場所則適用室內空氣品質管理法。

人類與建築物雖然皆置於自然大環境中，但民眾大部分時間都待在室內，因此最直接影響人類生活品質的介質為建築物之室內環境，影響室內環境的因子包括室外溫濕度、風速、日照以及污染物等 (簡裕榮和薛寧心，2004)。因此為了讓室內環境保持人的最佳舒適性，及提升工作效率，建築通風需求已經逐漸受到重視。除了法令有明確規定所需通風量外，也應對於建築通風方式進行探討，期望能節能減碳，甚至達成室內換氣量高於法律規範，以維持良好的室內空氣品質。為了提高機械通風效能，許多建築逐漸以氣密、密閉為主軸進行設計，導致自然通風之氣流無法滲透於室內。若只有仰賴機械通風維持室內環境，空調應時常保養或注意室內通風管線及進出風口配置是否不良，避免出、回風口蓄積髒污或換氣路徑不佳，使空氣滯留無法有效換氣，降低室內空氣品質。對於窗戶緊閉的室內場所來說，強烈建議可以善加利用適當的空氣通風口，尤其是在溫和氣候或適宜的天氣條件下，改善空氣品質最簡單的方法就是讓窗戶打開傾斜適當角度或事先讓房間進行通風(Batog & Badura, 2013)。

建築之通風換氣形式 (江哲銘，1997)可分為自然通風(Natural Ventilation)、機械通風(Mechanical Ventilation)和混合式通風(Hybrid Ventilation)三種，依不同的環境特性，可分別採用不同的換氣方式。若室內通風不良，除可能造成健康影響外，也可能造成意外事故的發生，例如部分建物因坪數小，使得熱水器不得不置於室內，或是熱水器置於陽台，但因曬衣服密度過高而變成阻隔戶外空氣進入陽台，造成通風不佳而導致一氧化碳中毒事故發生。當隨著通氣氣窗開口比例的增加，會使得一氧化碳不易累積，但仍得防範外氣將一氧化碳吹入室內的可能性(呂博弘等人，2006；戴志青，2013)。自然風的速度也是一大關鍵，當通氣風速低於 $3\times 10^{-4}\text{m/s}$ ，氣流運動主要為擴散作用，這時有無關閉連接陽台熱水器的大門，對一氧化碳濃度影響不大(張瑋如，2010)，但熱水器有無接導管至戶外對一氧化碳濃度影響甚大(呂博弘，2006)。因此使用熱水器時，除了開起門窗、關閉緊鄰門窗外，也可加設導管至戶外通風良好處，避免一氧化碳嚴重累積。

眾多因子皆會影響室內各流場的分布或人體舒適性，若於建築設計階段時，將風向、開口等因素一併考量，可有效利用自然因子，達成節能減碳的目的。就考量設計手法，除了以 CFD 事先模擬，李怡萱(2014)透過 CFD 數值模擬來比對自然通風潛力 VP(Ventilation Potential)評估法，此 VP

評估法是藉由建築平面圖來繪製通風面積並進行整體性評估。該研究整理出7種台灣常見之建築空間配置，將 CFD 與 VP 評估法相互比較，結果顯示 VP 值評估空間的通風效益具有可行性，可使設計者不必透過專業實驗模擬便可瞭解室內流場概況。

在廠區室內之工業通風(Industrial Ventilation)中，將通風換氣分為整體換氣(Displacement Ventilation)及局部排氣(Local Exhaust)(楊振鋒等人，2004)。整體換氣又稱為稀釋通風，即導入乾淨的新鮮空氣來稀釋室內受污染之氣流場，利用空氣中高壓流向低壓的特性產生流動，其造成氣流流動之驅動力可分為自然換氣與機械換氣，整體換氣費用較局部排氣低廉。局部換氣則是利用氣罩、風管、空氣清淨裝置及排氣機等裝置，將污染物質予以捕集，經清淨處理後並排至大氣。局部排氣主要常用於有限而密閉之化學作業且毒性較高者，常使用於有化學性危害之作業場所。而整體換氣則反之，其使用時機為污染濃度低且分布均勻時，主要應用在辦公室、戲院或住宅等非有限密閉之場所(楊振鋒等人，2004)。

2.2 自然通風

自然換氣不易確保理想的換氣效果，但其優點為維護容易又不需耗費電能，不需要機械動力即可換氣。在講求節能減碳的現代趨勢中，自然換氣已經成為建築設計的主要觀念。因此於設計建築時對建築座向，或是對建築採取被動式設計，如設置地中預冷管、捕風器、天窗及隔熱建築材料等，以降低建築能源之消耗(建造業議會，2018)。

國內研究常見的通風影響因子除了通風開口及尺寸、風速、室內熱量多寡外，室內擺設也會影響氣流流場或污染物的分布。陳浚國(2001)模擬密閉空間於不同風速且有無室內擺設下，受重力沉降效應的不同粒徑之微粒的沉積情況，研究指出室內流場之回流區域受到家具的形狀及擺置等因素影響，進而影響微粒的附著情況，且風速增加則因慣性機制導致微粒沉積率也隨著增加。李哲宏(2008)則以自然通風探討13種擺設模式下之速度流場與紊流黏度場之暫態及穩態分布，結果指出擺設對於通風氣流有相當之影響，也可利用擺設改變氣流路徑，進而改善室內空氣之流場。就開窗角度對室內通風影響而言，張倉榮(2001)利用自然通風，以低層建築物雙斜式溫室搭配4種開口，並分別設定不同開口角度，使用 CFD 模擬不同角度對室內流場造成之影響，結果指出迎風面之開口對通風換氣非常具有重要性，因此建築門窗開口也儘量置於迎風面處，若通風路徑流經污染區則對改善室內空氣品質有很大幫助。

傳統建築常見以架高地板、深出檐、斜率高的屋頂與適當開窗為主，可防止太陽直射屋內，而架高地板可讓室內隔絕部分濕氣，使室內維持良好的通風環境。許正傑等人(2011)以 CFD 模擬日式木造建築架高地板之不同開口部之室內通風與溫度變化，結果顯示增加合適的通風口，可有效降低室內溫度，且促進室內流場之對流。陳念祖(2001)以高架地板設置沖孔板，並變更其數量、位置與風速，探討室內之換氣次數、二氧化碳濃度場、空氣交換效率與風擊預測來評估換氣效率。

結果指出沖孔板數量與換氣次數有關，但其位置與換氣次數沒有明確相關性，風速過高會造成風擊，進而影響人體舒適性，但與傳統高氣窗相比，置換式通風之空氣交換率較佳。

2.3 機械通風

此方法為生活中最常見之通風形式，如中央空調、分離式冷氣等，大型空間(如辦公室等)常採用之傳統中央空調，其通風系統為了負荷整體空間需求，往往採以最大能力系統設計，設定人員使用空間時才開啟之個人化空調，具有明顯的節能效果(徐筱琪，2012)。節約能源雖說重要，但人員之舒適性也不可輕忽，室內氣流場的分布會影響人們的舒適性。當風速大於0.5m/s 時人體就可感受到氣流流動；在1.0m/s 以下時在溫熱環境中可以感到涼爽，在冬季時則會感到寒冷，而風速超過2.0m/s 時，會將桌面紙張吹起，甚至有風擊的情況，因此加大風速雖可有效排除污染物，但必須控制在合理範圍內(陳瑞玲等人，2010)。閔凱(2007)以 PMV-PPD 值、溫度分布、PMV 值及 PPD 值作為評估標準，探討不同風速與送風溫度對人之熱舒適性影響，結果顯示溫度對熱舒適性之影響大於風速，且提高風速及溫度可減小溫度梯度，但可能會有風擊不舒適之問題。

影響室內流場的因子包含風口位置、出風角度、配置數量及風速...等，因此有許多研究針對不同的變因，探討其對室內流場之影響。丘建宏(2010)，以方形出風口且出風角度為斜角向下45°吹出，並採用兩種不同尺寸之空調出風管徑，搭配配置不同數量之出回風口，模擬其對室內氣流場之影響，研究顯示小口徑有較均勻之速度及紊流場，可降低風擊不滿意度，回風口配置及出風口尺寸對於溫度場之影響較小。而出風口數量減少，使得出風口與回風口間距增加，可讓氣流有充分的停留、循環，再由回風口排出，也不易造成短流現象。

2.4 混合通風

混合通風系統為結合自然通風與機械通風兩者優點之較佳控制手法。在適合自然通風的季節以自然換氣為主、機械換氣為輔，如自然風由窗口進氣，搭配風扇、排風扇等機械設備引導氣流之路徑可於室內作充足的循環(謝志昌，2008)，但進出風口設置位置需注意不可過近，避免造成氣流短流，且也需考量室內人員及其行為與周遭環境等因素。

此方法一方面在可自然通風時可節省機械通風能源消耗、降低負擔，另一方面則因應氣候變化，適當地調變自然與機械通風不同模式使用(謝志昌，2008)。機械通風可輔助自然通風換氣量不足的情況，達到節能減碳及維持室內舒適性、健康性之目標。而混合通風系統的優點除了節能外，其機械通風可確保室內外換氣量，又因有自然進氣因素的增加，研究證實室內外空氣流量提高以及長時間通風換氣，可降低病態建築症候群發生的可能(行政院環境部，2017)。

混合通風與傳統空調設計相比，採用混合通風的建築可顯著降低整體能耗和碳排放量(Fu & Wu, 2015)。謝志昌(2008)模擬辦公室空間，以裝設水平導風板之不同窗口位置(高窗、低窗及高低

窗)搭配不同數量排風扇及風量，分析其室內速度場、溫度場及污染物濃度場，瞭解混合通風對於室內通風效益影響。結果顯示污染物移除效率較佳為高低窗設置導風板之案例，且排風扇組數較無明顯影響。一般家庭或辦公室之室內混合通風換氣常為開啟門窗並搭配立扇、吊扇等方法，Song & Meng (2015)以教室為空間對象，並設定四種情況進行模擬(開啟上排窗、開啟上下排窗、開啟上下排窗並設置排風扇、開啟上下排窗並設置吊扇)，研究顯示開啟上下排窗戶即可有效改善室內熱舒適性，而設置排風扇、吊扇也是如此，且吊扇可以更改善人員之使用區域環境。

2.5 建築通風導致的疾病

建築通風與生活息息相關，對於孩童、年長者和慢性病人更加重要，兒童的呼吸量與體重比高於成人50%，因此更形受到室內污染物的危害。因此具有良好的室內通風環境，可以減少影響人體健康之病態建築症候群(Sick Building Syndrome, SBS)及其他疾病的發生(行政院環境部，2025)。SBS 一詞源於1970年代被提出，早期研究發現在辦公室中使用中央空調的人員有各種急性、暫時性的不適症狀發生，包括氣喘、過敏、打噴嚏、頭痛、注意力不集中、昏睡等(社團法人台灣病態建築診斷協會，2018)。WHO 報告指出全球因室內污染死於氣喘的人高達10萬人，且35%為兒童(行政院環境部，2017)。大部分症候群個案發生都在設有中央空調、無開啟室窗戶或門窗緊密無法與外氣通風的建築中，但當人員休假或離開該空間一段時間後，其症狀會減輕或消失(林韻芬、莊海華，2012；社團法人台灣病態建築診斷協會，2018)。

除了 SBS，與室內相關疾病還包含了過敏性、呼吸性疾病、傳染性及癌症(行政院環境部，2017)。例如「退伍軍人症」(Legionellosis)，退伍軍人桿菌常出現在有水的環境，包括河川、池塘、空調系統、水塔等，若未常清理冷卻水塔，其貯水池環境容易孳生微生物，也可能會含有退伍軍人桿菌，因而使民眾吸入含有此病菌之霧滴，因此需定期清潔水塔或加入抗藻劑等藥劑，抑制其孳生，且中央空調的外氣進氣口位置應避免於水塔排氣口一定範圍內，否則帶有藥劑的水霧伴隨著外氣等進入其進氣口，影響室內空氣品質(行政院環境部，2017；衛生福利部疾病管制署，2025)。罹患「退伍軍人症」之患者會有發燒、頭痛甚至肺炎的發生，嚴重者則會有呼吸衰竭，死亡率達15%(衛生福利部疾病管制署，2025)。

三、研究方法

過去勞工對於職場室內空氣品質之要求較為薄弱，甚至對於空氣好壞毫無觀念，經過社會進步、媒體傳播，以及法令對室內空氣品質標準之規定的實踐，企業與民眾漸漸開始重視室內空氣品質的優劣，而較差的室內空氣品質甚至會影響到人體的健康。一般的常見室內空氣污染物中包含之二氧化碳，常作為評估室內空氣品質優劣之標準，原因為二氧化碳濃度之高、低與場所人員使用密度及室內通風換氣的能力有關(行政院環境部，2025)，因此本研究以二氧化碳濃度場、速度場以及流向，分析室內空間流場之狀態，藉此擬提出最佳改善室內流場方案，作為改善室內空

氣品質之建議。

3.1 研究對象

本研究將以某作業場所之大廳為研究對象，該場所係使用天花板嵌入型之空調，因冷氣不斷進行室內循環的情形下，室內外換氣明顯不足，導致室內空氣品質不佳，CO₂濃度偏高。由於此場所為承租使用，因此受到不能改變現有空間使用狀況、空調系統及建築結構之限制，本研究即在嘗試探討如何有效解決場所通風換氣能力不足的情形。因此在進行實體通風改善前，本研究將採用 CFD 模擬場所內部流場及 CO₂濃度變化，以提出可行的通風換氣改善方案。本研究將先於現場丈量及蒐集相關參數後，以 CFD-GEOM 軟體工具實施建模，場所的空間平面配置及天花板配置如圖3-1、圖3-2所示。本研究將以此場所目前使用實際現況-大門關閉案例模擬之流場狀況(風速場、二氧化碳濃度場)作為原始背景，後續模擬其他不同通風方式案例，並與原始背景(大門關閉之流場狀況)做比較，以評估結果做為場所改善之建議。本研究單純探討空間內風速、風向及二氧化碳分布及蓄積量，忽略燈具及事務機熱源等因素對速度流向造成之影響。



圖4-1 場所空間平面配置圖

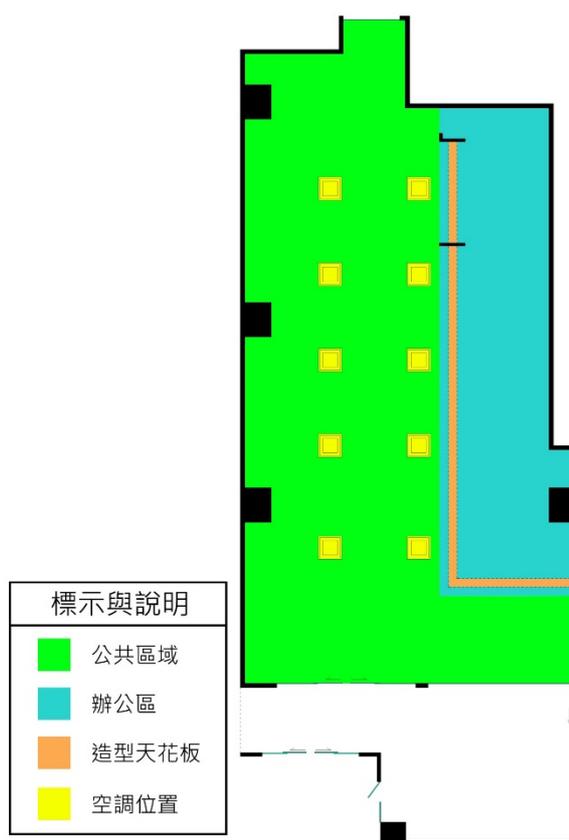


圖4-2 天花板及冷氣配置圖



3.2 數值方法

本研究將以某作業場所使用冷氣之大廳作為探討空間，在不改變建築原有之配置及結構(如加

開窗戶、拆除隔間)，維持空調開啟循環之狀況下，提出四種通風方法，探討改善室內空氣品質之可行性。由於現實空間活動情況(如現實中公共場所人員流動不固定等)有很多不確定性因素無法如實模擬，因此本研究將先在模擬條件上先做簡化，並利用室內二氧化碳濃度的變化來評估各種通風方法之成效。四種通風改善方法分別為：(1)關閉大門及空調引進新鮮外氣、(2)開啟大門、(3)開啟大門及設置立扇、(4)關閉或開啟大門及設置進排風扇。

軟體之數值分析係使用有限體積法求解三大守恆：質量守恆(mass)、動量守恆(momentum)及能量守恆(energy)方程式(連奕輔，2012)。以此三項統御方程式作為流體行為計算之基礎，經分析獲得流體之速度、壓力及二氧化碳等數值，最後再利用後製軟體 CFD-VIEW 將三種數值數值可視化，分析並獲得三種流場之空間分布及各截面圖與分布圖。

本研究預計使用之模擬數值分析軟體為 ESI-CFD (ESI Corporation - Computational Fluid Dynamics)，先以 CFD-GEOM 建構模型空間幾何尺寸、結構網格，並設定體積與邊界條件後，套入 CFD-ACE+軟體設定參數條件，再進行計算。ESI-CFD 軟體可應用於各種領域，如流場、熱傳、磁場、電場、電漿、應力、粒子、化學等多樣分析，而其軟體細分為 CFD-GEOM、CFD-ACE+、CFD-TOPO、CFD-FASTRAN、CFD-VisCART、CFD-CADalyzer、CFD-VIEW 等部分，分別可進行前處理幾何模型之建立、網格之建立、數值運算分析以及數值結果後處理可視化呈現等(ESI CFD, 2018)。而本研究使用 GEOM、ACE+與 VIEW 三套軟體進行數值模擬

3.3 模擬參數設定及說明

本研究預計所有模擬之空間、物件、門窗、人體及空調等尺寸與參數總整理如表3-1所示。

表3-1 本研究預計模擬之參數

項目	尺寸	參數設定	性質	數量
出風口	82×82 cm	風速2.52 m/s，角度45° CO ₂ -5000 ppm、400 ppm	Inlet	20
人體 (坐姿)	45×50×高150 cm	忽略人體熱輻射 呼吸帶高度距離地面130 cm	Wall	32
人體 CO ₂ 出口	直徑10 cm	CO ₂ 產生量0.3 L/min	Inlet	32
立扇	高80 cm	14吋三片式，轉速1200 rpm	Inlet	4
陽台大門	164×高203 cm	自然通風其風速為0、0.5、1 m/s CO ₂ -400 ppm	Inlet	1
大門(前)門縫	200×高1 cm	一大氣壓	Outlet	1
大門	200×高212 cm	一大氣壓	Outlet	1

項目	尺寸	參數設定	性質	數量
		非滑動邊界條件(no slip)	Wall	
回風口	52×52 cm	一大氣壓	Outlet	10
室內後門門縫	200×高1 cm	一大氣壓	Outlet	1
走廊兩側 通道	222×高222 cm	一大氣壓	Outlet	2
室內後門	200×高209 cm	非滑動邊界條件(no slip)	Wall	1
櫃台	90×高78 cm	非滑動邊界條件(no slip)	Wall	2
	90×高105 cm			1
桌子	540×130×高70 cm	非滑動邊界條件(no slip)	Wall	1
桌子	278×118×高70 cm	非滑動邊界條件(no slip)	Wall	1
椅子	45×50×高43 cm	非滑動邊界條件(no slip)	Wall	16
中長椅	45×160×高43 cm	非滑動邊界條件(no slip)	Wall	12
大長椅	45×500×高43 cm	非滑動邊界條件(no slip)	Wall	2
消防排煙口	90×80 cm	非滑動邊界條件(no slip)	Wall	1
牆面	室內高度230 cm	非滑動邊界條件(no slip)	Wall	1
造型天花板	30×高30 cm	非滑動邊界條件(no slip)	Wall	1

本研究將先模擬某公共場所內，存在人數32人下之大門關閉且空調內循環(二氧化碳濃度-5000 ppm)與引進新鮮外氣對流場之影響，於大門關閉案例中，將空調引入新鮮外氣之二氧化碳濃度另設定為400 ppm，並置入人數32人進行模擬。而後模擬在空調內循環下開啟大門，且設定速為0及0.5 m/s之自然風經由陽台門，再經過場所大門進入室內，以探討低風速之室外空氣進入室內之流場狀況，此開門自然風吹入之案例僅探討室內32人的情境。此外，為探討混合通風對室內流場之影響，本研究將在空調內循環情況下，新增兩種機械換氣手法，一為在開啟大門案例中放置四台直立式風扇，分析風扇對於室內流場之影響；二為關閉大門及開啟大門(0 m/s)案例中，設置三組及六組進排風扇，分析進排風扇數量與開門/關門對室內流場之影響，機械換氣僅探討室內人數32人。

四、結果與討論

4.1 空調內循環以及引新鮮外氣兩種案例之二氧化碳濃度場

一、空調內循環

(1) 關閉大門，空調出風 CO₂濃度-5000 ppm

圖4-1為關閉大門之空間模型示意圖，由圖4-2、圖4-3所示，室內人數為32人時之空調下方有



風流動的區域，其二氧化碳濃度累積較低，反之於氣旋滯留區域(辦公區、空間角落)則二氧化碳濃度蓄積較嚴重。因二氧化碳密度較空氣大，因此其累積情況皆由底部開始蓄積。由於室內二氧化碳主要來源為人員呼吸代謝，因此使用內循環之空調環境，減少室內人數對二氧化碳蓄積之改善將是有明顯的幫助。

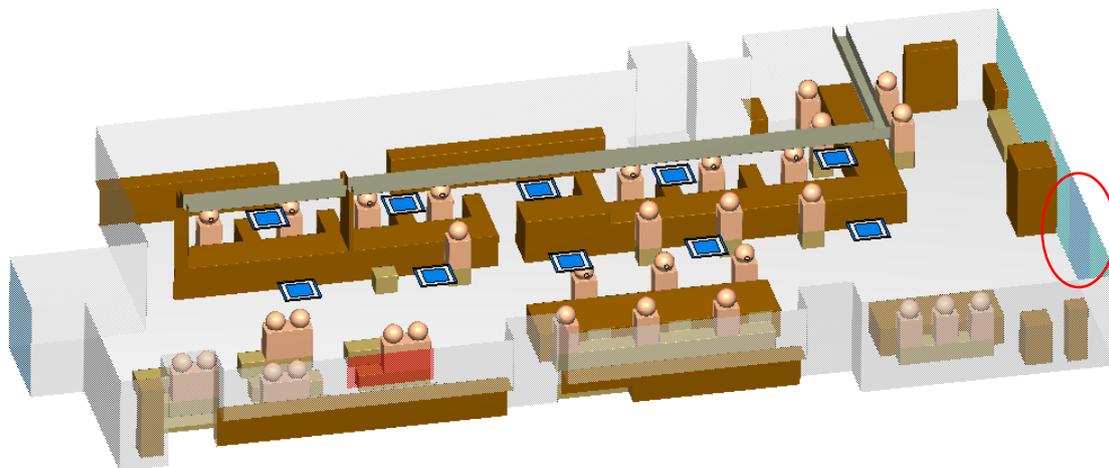


圖4-1 自然通風-關閉大門風速0 m/s之模型示意圖

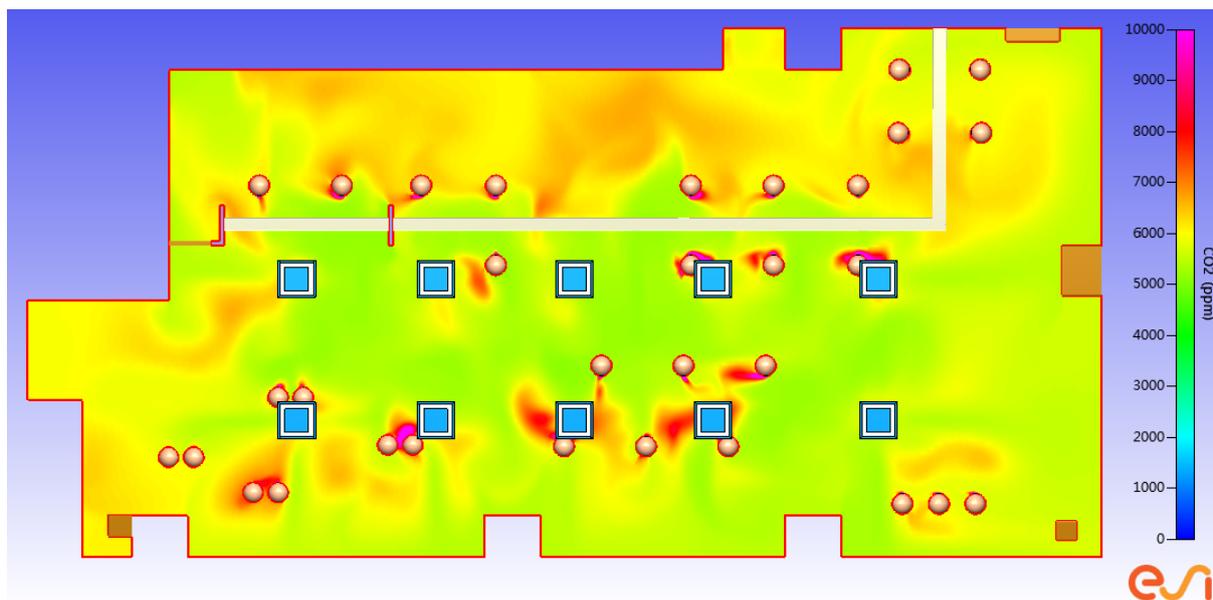


圖4-2 案例32人-關門-空調出風口濃度5000ppm，二氧化碳濃度場於高度 Z=1.3 m



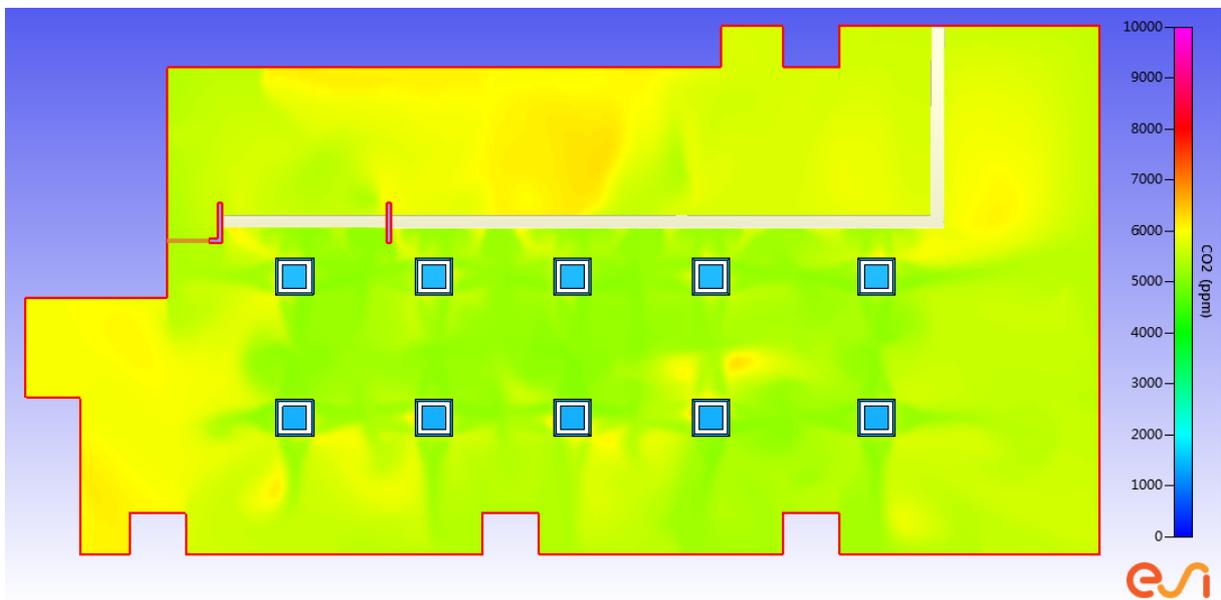


圖4-3 案例32人-關門-空調出風口濃度5000ppm，二氧化碳濃度場於高度 Z=2 m

二、空調引進新鮮外氣

當關閉大門，空調出風 CO₂濃度400 ppm 時，由圖4-4、圖4-5所示，32人之室內空間二氧化碳蓄積位置與空調內循環案例相同，皆累積於於低風速之區域，如空間角落與門口附近，而 Z=2 m 處可看到辦公區因造型天花板阻擋氣流流入，因此也有二氧化碳蓄積的情況。但與空調內循環案例相比，空調引進新鮮外氣後空間整體二氧化碳濃度下降非常明顯。因二氧化碳較空氣重，因此由空間底部開始蓄積。室內32人之二氧化碳平均值分別為1314 ppm。

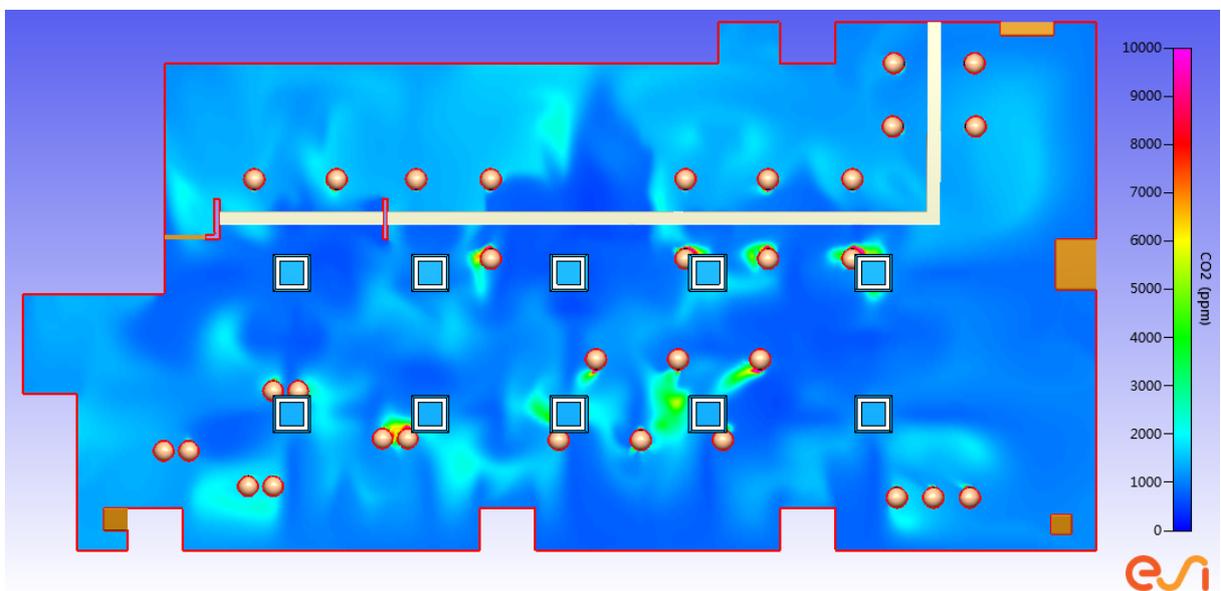


圖4-4 案例32人-關門-空調出風口濃度400ppm，二氧化碳濃度場於高度 Z=1.3 m



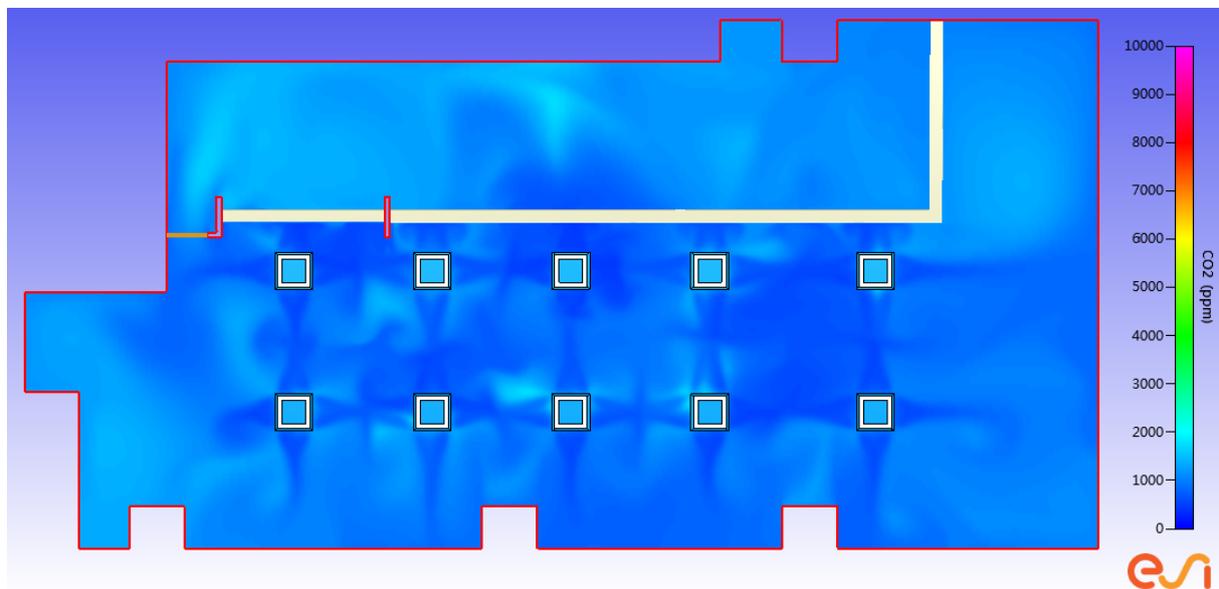


圖4-5 案例32人-關門-空調出風口濃度400ppm，二氧化碳濃度場於高度 $Z=2$ m

4.2 空調內循環下開啟大門對通風效益之影響

(1) 開啟大門，風速 0 m/s，空調出風 CO_2 濃度-5000 ppm

圖4-6 為開啟大門之空間模型示意圖，由圖4-7、圖4-8所示，二氧化碳蓄積位置與關門案例相同，皆發生於較無風速或角落之區域，如辦公區及無空調在上方之區域。但與關門唯一差異在於開啟大門有些微氣流交換，使得室內氣流流動有部分差異，進而影響了二氧化碳濃度，其中靠近大門位置二氧化碳濃度較低。因二氧化碳特性因素，由由低處開始蓄積，因而使得 $Z=2$ m 處二氧化碳濃度較 $Z=1.3$ m 處低。在此室內32人之案例，人體呼吸帶高度 1.3 m 處二氧化碳濃度平均值為 5920 ppm，僅低於關門案例約 16 ppm，打開門無風速時，對於室內通風換氣的改善相當有限。

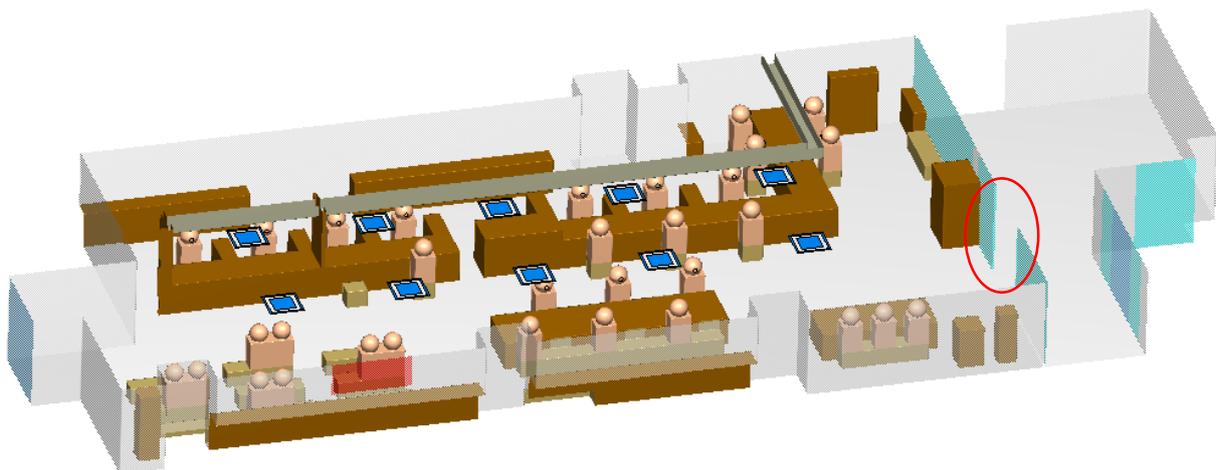


圖4-6 自然通風-風速 0 、 0.5 m/s 之模型示意圖



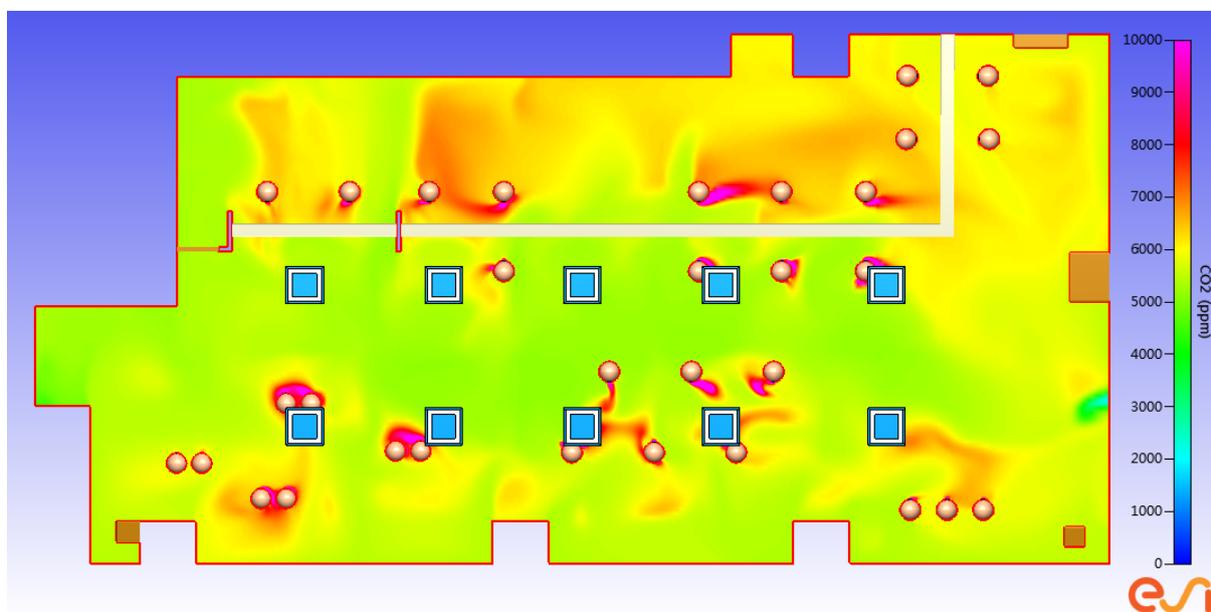


圖4-7 案例32人-開門-風速0m/s-空調出風口濃度5000ppm，二氧化碳濃度場於高度 Z=1.3 m

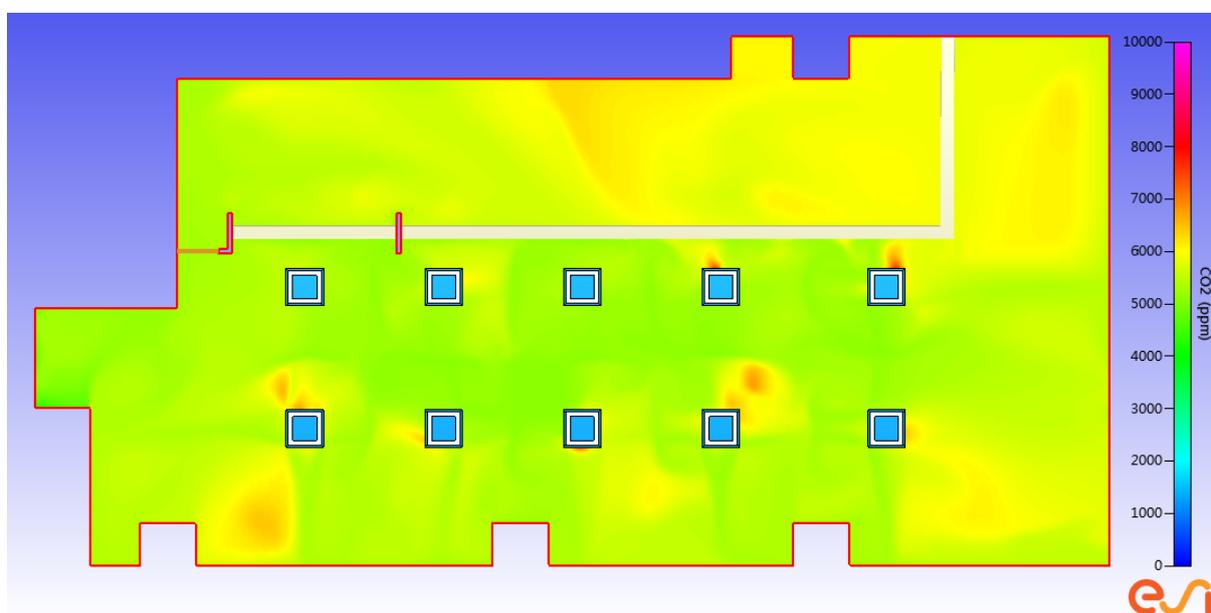


圖4-8 案例32人-開門-風速0m/s-空調出風口濃度5000ppm，二氧化碳濃度場於高度 Z=2 m

(2) 開啟大門，風速0.5 m/s，空調出風 CO₂濃度-5000 ppm

由圖4-9、4-10所示，二氧化碳主要蓄積位置與開門案例相同都發生在低速滯留區域，如辦公區及角落。在 Z=1.3 m 處可看出自然風風速為0.5 m/s 時，因其風壓小導致氣流較無法進入室內換氣，室內二氧化碳僅有在空調下方累積較少。在 Z=2 m 處因二氧化碳特性由低處開始蓄積，因此濃度較 Z=1.3 m 處低。此室內32人之案例，在呼吸帶 Z=1.3 m 處二氧化碳濃度平均值為5923 ppm，僅高於開門案例3 ppm，對於室內通風換氣並無助益。



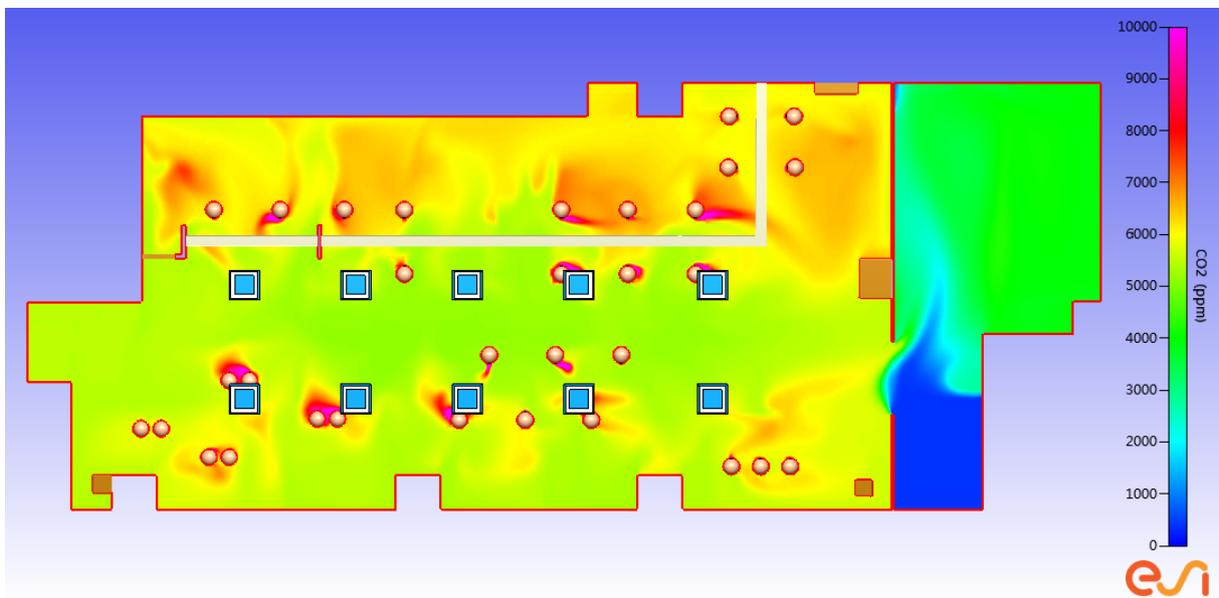


圖4-9 案例32人-開門-風速0.5m/s-空調出風口濃度5000ppm，二氧化碳濃度場於高度 $Z=1.3$ m

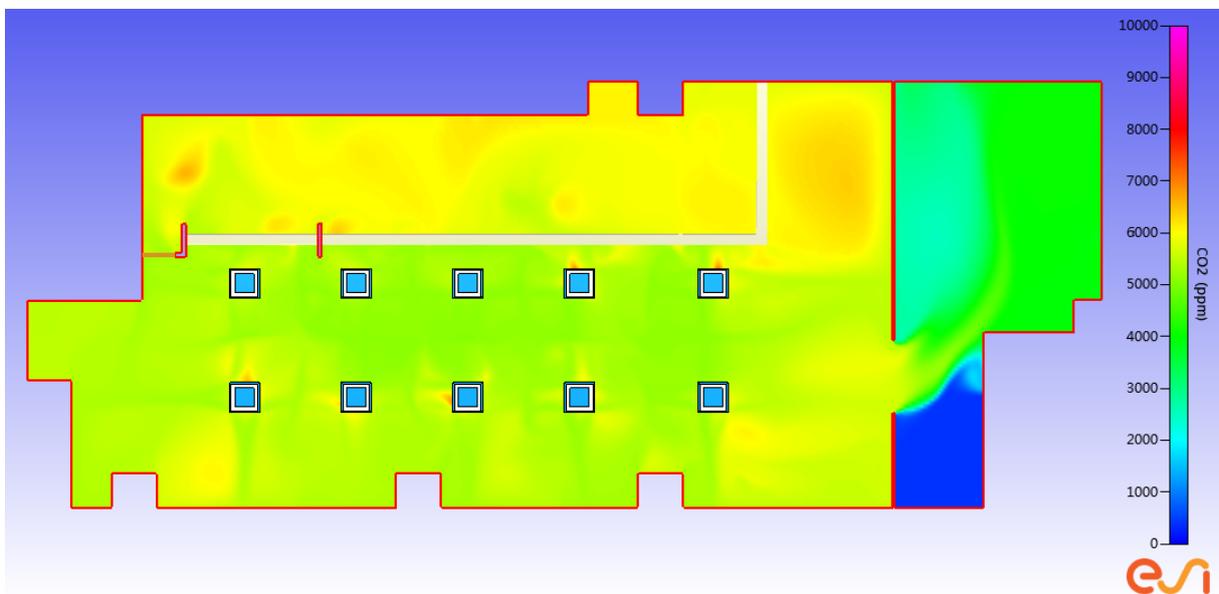


圖4-10 案例32人-開門-風速0.5m/s-空調出風口濃度5000ppm，二氧化碳濃度場於高度 $Z=2$ m

4.3 空調內循環下設置立扇之二氧化碳濃度場

(1)設置立扇，開啟大門，風速0 m/s，空調出風 CO_2 濃度固定-5000 ppm

圖4-11為四台立扇位置圖 (A、B、C、D)，由圖4-12所示，四個立扇 A、B、C、D 主要是扮演室內空氣流動推手，雖有空氣經由大門流出，然與外氣進行交換引入新鮮空氣的能力相當有限，導致只有空調下方周圍區域與室內大門前方區域的二氧化碳濃度較低。而立扇 C 的氣流使得空間底部及其附近空調短流，也造成其附近區域的二氧化碳蓄積更為嚴重。呼吸帶高度 $Z=1.3$ m 處二氧化碳平均濃度約為6448 ppm。



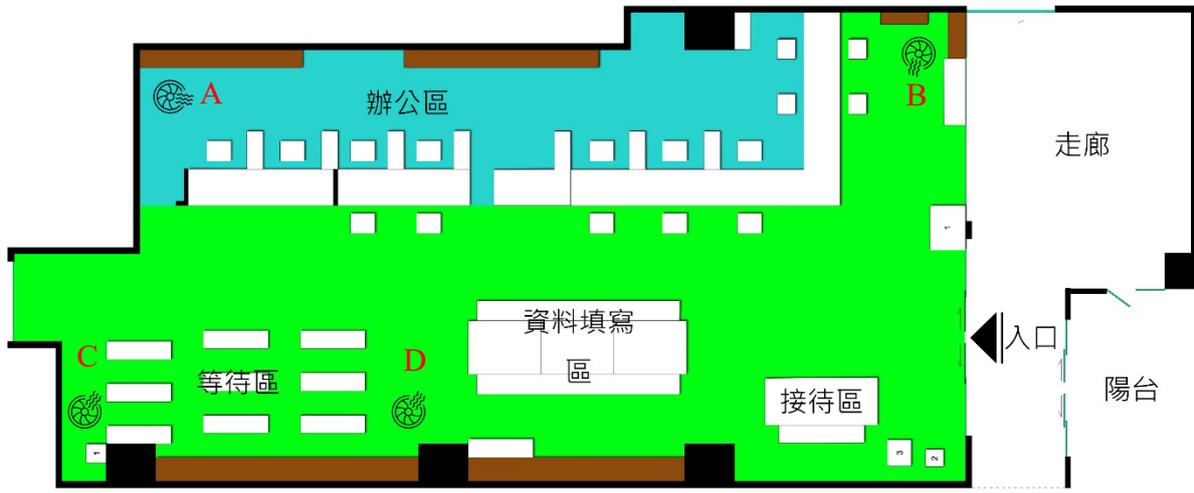


圖4-11 立扇位置示意圖

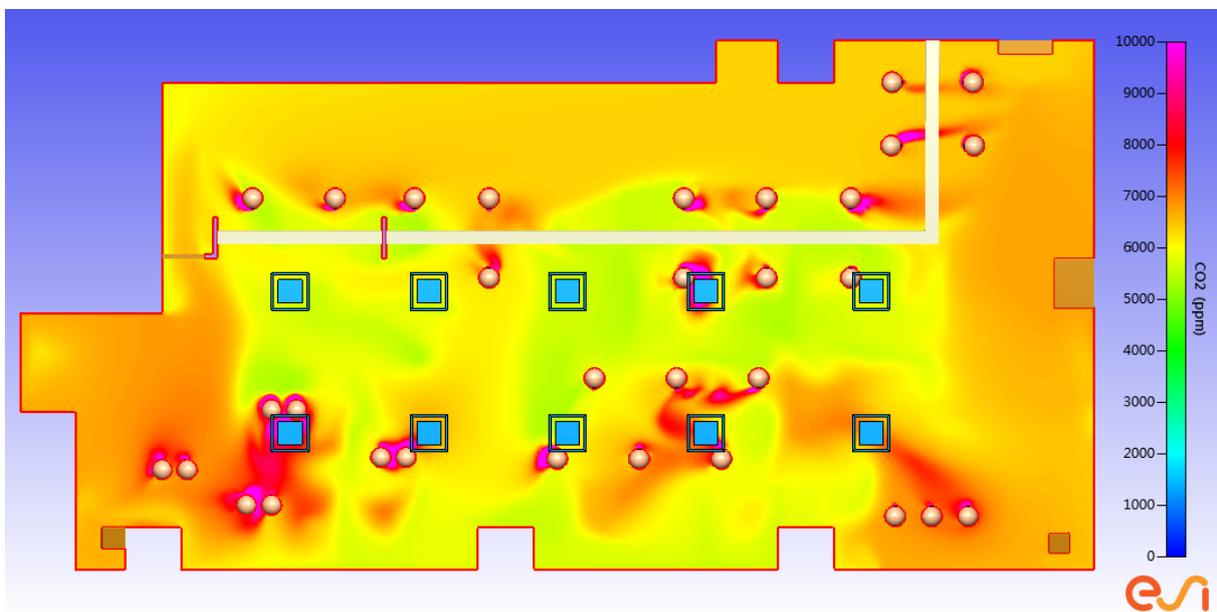


圖4-12 案例32人-開門-立扇-大門風速0m/s-空調出風口濃度5000ppm，二氧化碳濃度場於高度
 $Z=1.3\text{ m}$

(2)設置立扇，開啟大門，風速1 m/s，空調出風 CO_2 濃度固定-5000 ppm

由圖4-13所示，立扇雖帶動室內氣流流動，但從陽台門吹入之自然氣流風速為1 m/s 時，立扇 B 吹出之氣流正好成為阻撓室外自然氣流與室內空氣置換的氣簾，使得空間類似於關門狀態，僅有空調下方周圍區域與大門前方二氧化碳濃度較低，而其他區域也受風扇影響(如室內左下角)造成空調短流，無法將二氧化碳降低。呼吸帶高度二氧化碳平均濃度約6618 ppm，比自然氣流風速為0m/s 之無風案例還高約170 ppm，為所有通風改善方法中最無效的方式。



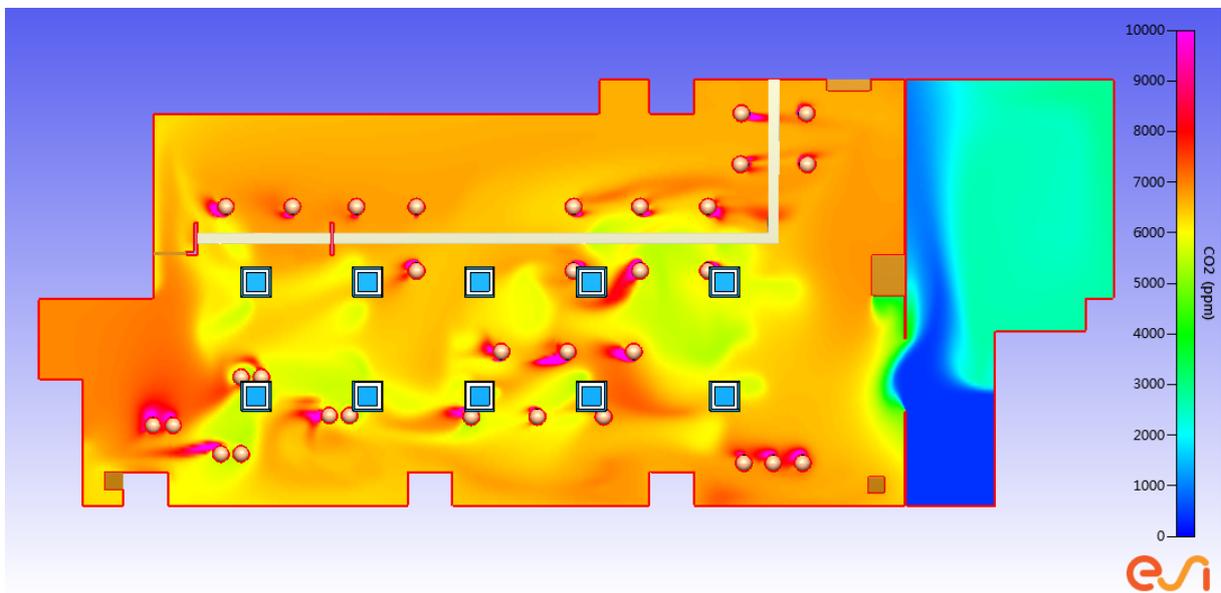


圖4-13 案例32人-開門-立扇-大門風速1m/s-空調出風口濃度5000ppm，二氧化碳濃度場於高度
Z=1.3 m

4.4 空調內循環下設置進排氣系統之二氧化碳濃度場

(1)關閉大門，設置三組進排風扇，空調出風 CO₂濃度固定-5000 ppm

圖4-14為三組進排風扇位置圖，由圖4-15所示，在高度 Z=1.3 m 可觀察到所有進風扇前方的二氧化碳濃度都略低於其他氣流滯留(如空間角落等)之區域。進風扇 A、C 吹出之氣流形成類似氣簾作用，導致右上區及右下區比其他區域蓄積之二氧化碳濃度更高。僅有一台進風扇 A 導入外面新鮮空氣之氣流強度，無法使整個辦公區的氣流流動，因此辦公區二氧化碳濃度也略高於公共區設置之空調下方區域的二氧化碳濃度。在室內人數為32人時，人體呼吸帶高度 Z=1.3 m 處的二氧化碳平均濃度約5296 ppm。

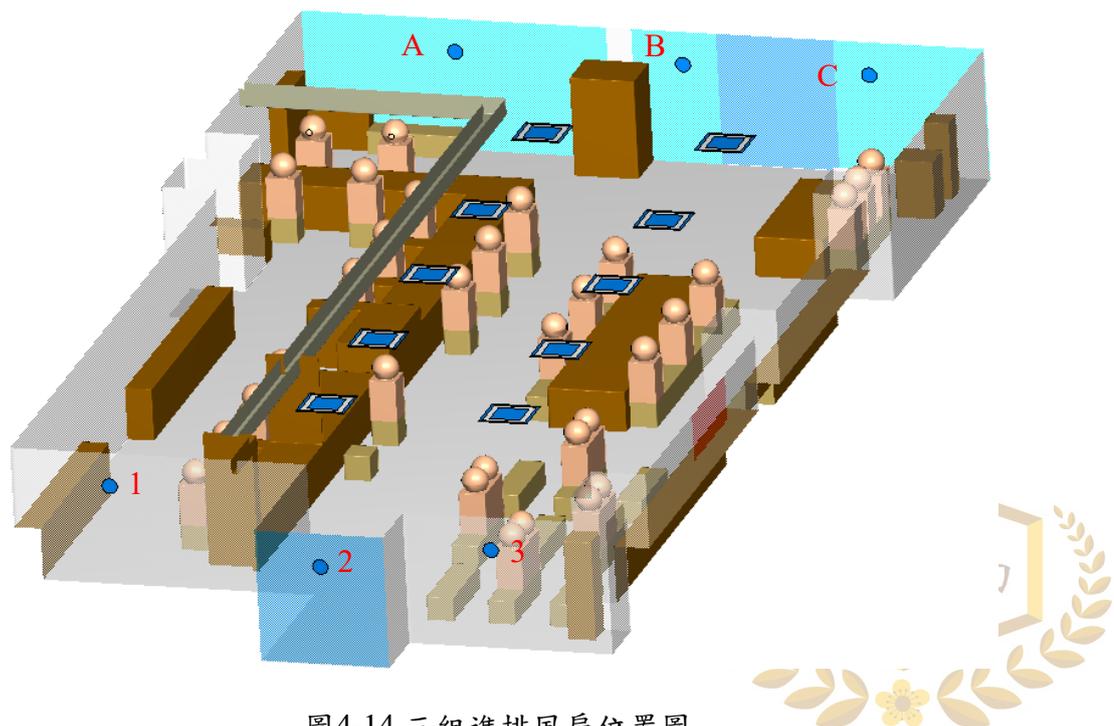


圖4-14 三組進排風扇位置圖

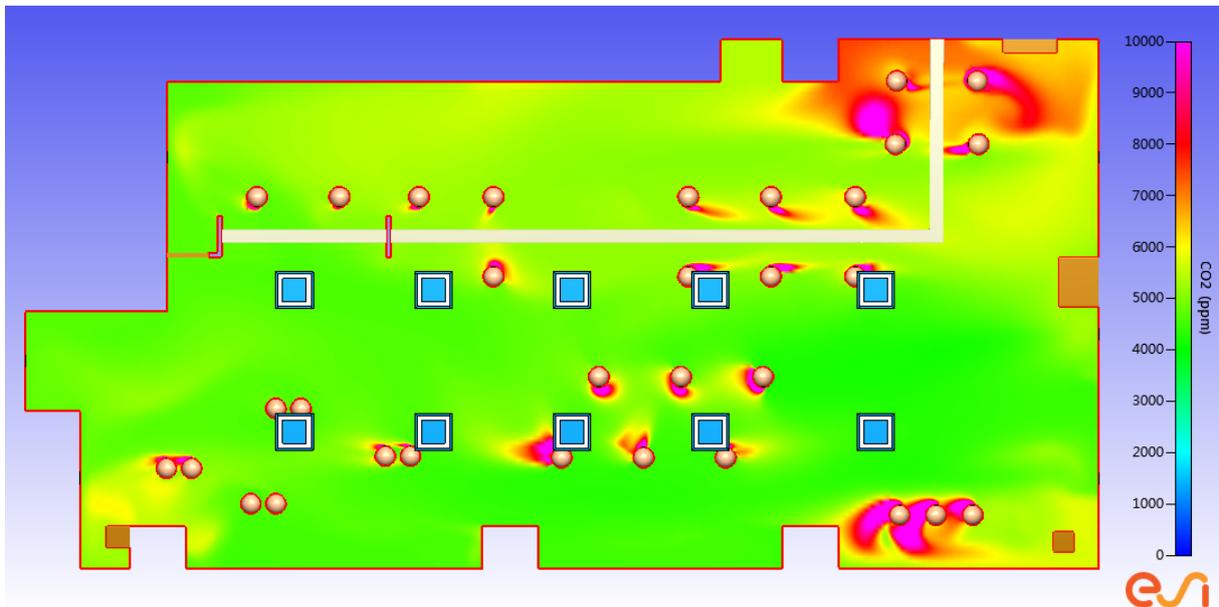


圖4-15 案例32人-關門-3組進排風扇-空調出風口濃度5000ppm，二氧化碳濃度場於高度 $Z=1.3$ m

(2)關閉大門，設置六組進排風扇，空調出風 CO_2 濃度固定-5000 ppm

圖4-16為六組進排風扇位置圖，由圖4-17所示，由於三組進風扇 A、B、C 引入的新鮮空氣氣流流經辦公區，導致二氧化碳濃度較低，而六台進風扇前方區域二氧化碳濃度都略低，僅有人員周遭以及受空調出回風等因素影響無法往左半區移動之交界處區域、與氣流速度慢、滯留區域(如空間角落)的二氧化碳濃度較高。在室內人數為32人時，呼吸帶高度 $Z=1.3$ m 處的二氧化碳平均濃度約4537 ppm，顯示裝設六組進排風扇對室內的換氣效果比三組來得好。

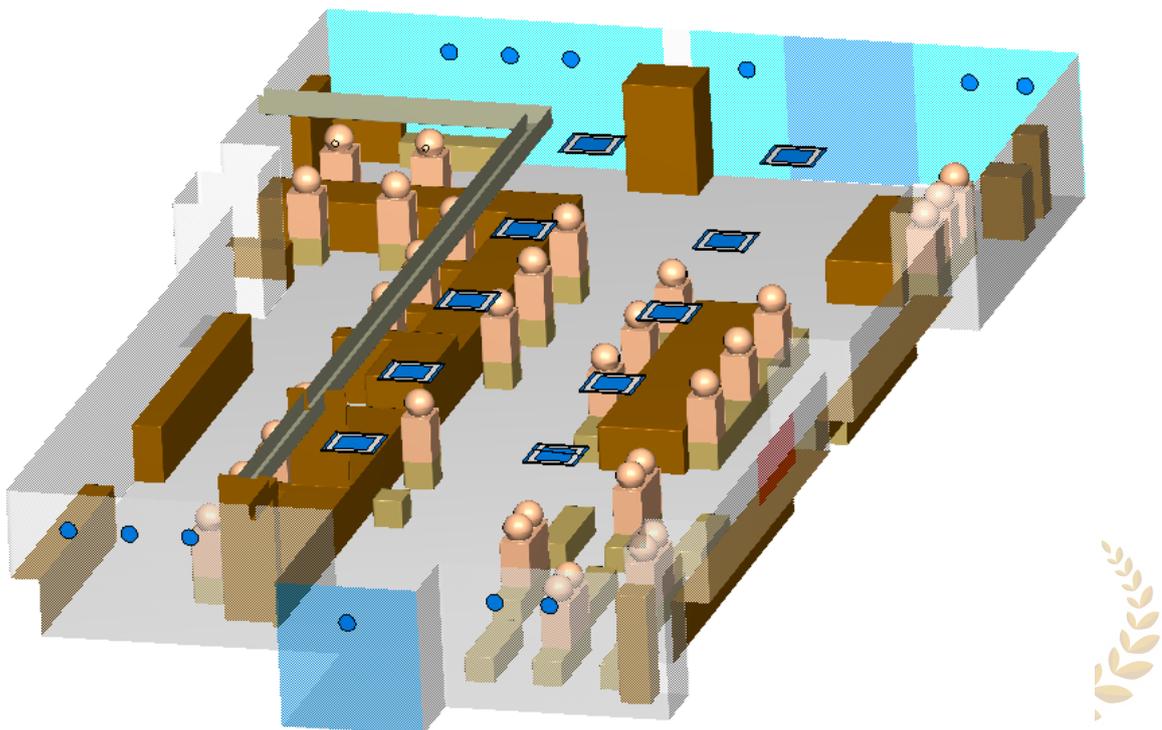


圖4-16 六組進排風扇位置圖

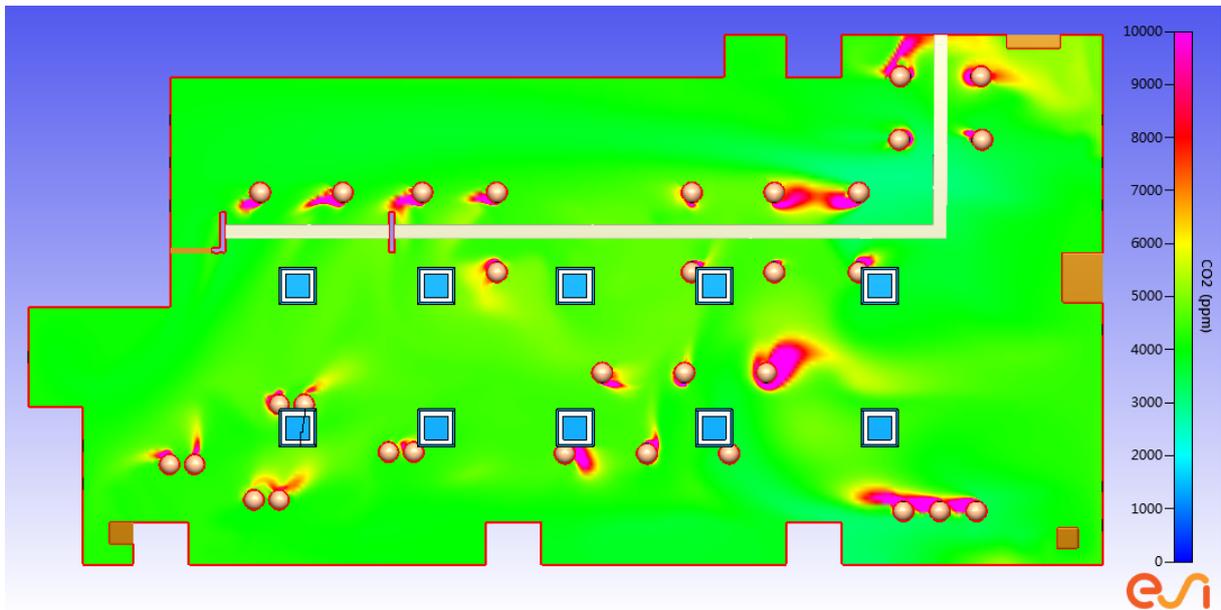


圖4-17 案例32人-關門-6組進排風扇-空調出風口濃度5000ppm，二氧化碳濃度場於高度 Z=1.3 m

(3)開啟大門，設置三組進排風扇，空調出風 CO₂濃度固定-5000 ppm

由圖4-18所示，與關門案例類似，在高度1.3 m處可觀察到因進風扇 A、C 吹出之氣流形成類似氣簾效應，導致空間右上區及右下區比其他區域之二氧化碳蓄積量高，空間角落等滯留區域，二氧化碳也有蓄積的現象。與關門案例相比，開門後因室內外氣流進出置換，使得門前區域二氧化碳濃度較低，也導致整體二氧化碳濃度略低於關門案例。在室內人數為32人時，人體呼吸帶高度 Z=1.3 m 處二氧化碳平均濃度約5111 ppm，顯示裝設三組進排風扇運轉下，開門對於室內外通風換氣的改善相當有限。

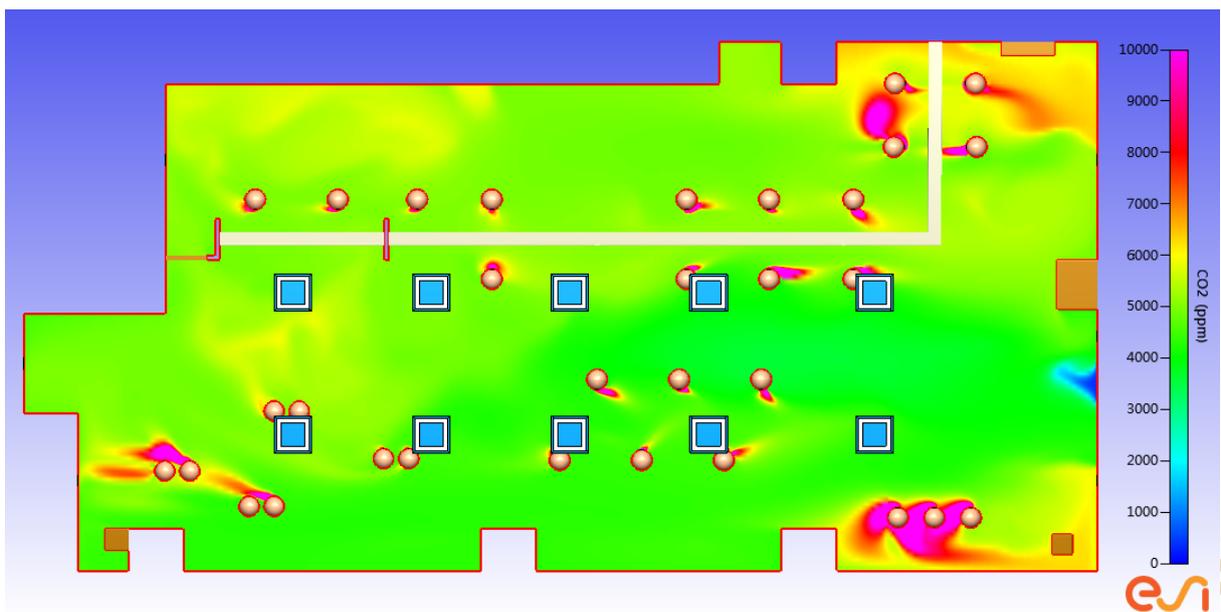


圖4-18 案例32人-開門-3組進排風扇-空調出風口濃度5000ppm，二氧化碳濃度場於高度 Z=1.3 m

(6)開啟大門，設置六組進排風扇，空調出風 CO₂濃度固定-5000 ppm

由圖4-19所示，由於進風扇 A、B、C 吹入新鮮的氣流，使辦公區的二氧化碳蓄積量變少，而室內進風扇前方區域的二氧化碳濃度都明顯下降，僅有在人員周遭以及公共區氣流受空調出回風阻擋等因素影響而無法往左半區移動之左半空間與氣流速度慢、滯留區域(如空間角落)的二氧化碳濃度較高。與關門案例相比，原本滯留於室內大門前區域的二氧化碳，因開門讓氣流進出換氣的關係，門前區域蓄積的二氧化碳更少。在室內人數為32人時，呼吸帶高度 Z=1.3 m 處的二氧化碳平均濃度約3549 ppm，顯示開門及六組進排風扇運轉下，又比五組時的通風換氣效果更好。

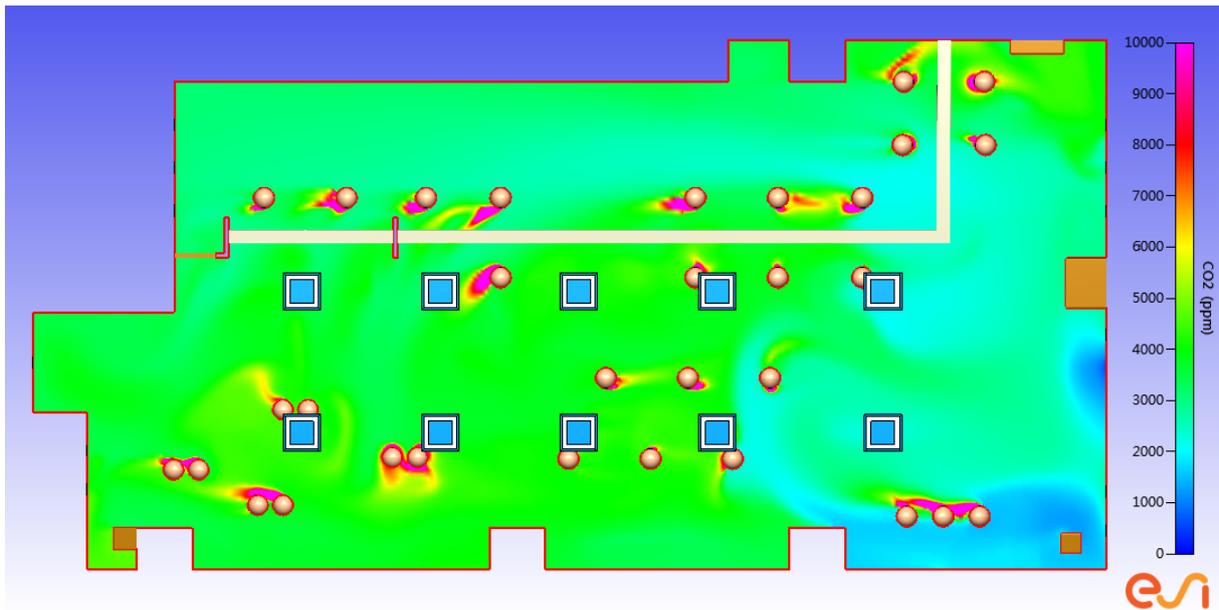


圖4-19 案例32人-開門-6組進排風扇-空調出風口濃度5000ppm，二氧化碳濃度場於高度 Z=1.3 m

五、結論

為改善現有室內循環空調換氣不足導致空氣品質惡化的問題，本研究以 CO₂為通風換氣指標，透過 CFD 模擬某公共場所大廳維持空調開啟循環狀況下，探討四種通風方法之通風換氣效果，研究分析後得出以下結論：

1. 直接引入外氣透過室內多台空調機分散至室內場所各處之通風換氣效果佳，是一最有效降低室內二氧化碳濃度的方式。室內人數對整體流場並無太大影響，但人多增加呼吸二氧化碳排放量，且於人與人之間存在氣旋導致室內平均二氧化碳濃度上升。
2. 開啟大門(無風)與關門案例相比較，室內整體流場並無太大差異，僅在大門區域有些許影響，室內二氧化碳平均濃度降低不到50 ppm。而自然氣流吹入風速低時(≤ 1 m/s)無法克服室內壓力，因此氣流被堵住無法入內進行空氣置換，對室內通風換氣無明顯幫助。
3. 設置立扇可促使室內空氣流動，但立扇氣流可能會擾動氣流造成空調出回風短流，導致室內空氣品質惡化。尤其開門自然風吹入風速為1 m/s，立扇 B 氣流與自然風風壓相近而形成風牆，使空間呈現類似關門狀態，導致比開門(無風)的二氧化碳平均濃度還高。
4. 設置三組進排風扇與原有流場相比，可明顯降低呼吸帶高度的二氧化碳濃度。三組進排風扇氣流會受到空調氣流阻擋，進風扇風壓並無法使室外新鮮空氣有效流向狹長型空間的後門區域，

通風改善效果有限。若增設進排風扇數量來加強風壓，可促進新鮮氣流往空間內部移動，進而提升室內外換氣效果，開門及設置進排風扇之通風效果又比關門的情況佳。

六、參考文獻

1. 內政部國土署(2015)。建築技術規則。取自：<http://w3.cpami.gov.tw/law/law/lawe-2/b-rule.htm>。
2. 丘建宏(2010)。不同空調通風條件對於室內空間流場之 CFD 模擬。國立中央大學土木工程學系碩士論文，未出版，桃園市。
3. 行政院環境部(2017)。室內空氣品質維護管理專責人員訓練教材。桃園市：行政院環境保護署環境保護人員訓練所。
4. 行政院環境部(2017)。室內空氣品質維護管理專責人員訓練教材。桃園市：行政院環境保護署環境保護人員訓練所。
5. 行政院環境部(2025)。室內空氣品質資訊網。取自：<https://iaq.moenv.gov.tw/indoorair/Default.aspx>。
6. 呂博弘、陳春萬、張振平(2006)。陽台通風影響瓦斯熱水器一氧化碳累積之研究。勞工安全衛生研究季刊，14(4)，299-307。
7. 李哲宏(2008)。室內之物件擺設對於自然通風的影響。國立臺灣海洋大學機械與機電工程學系碩士論文，未出版，基隆市。
8. 沈世宏(2008)。尋找綠色契機-國內替代燃料發展。環保政策月刊。臺北市：行政院環境保護署。
9. 林韻芬、莊海華(2012)。室內空氣與健康：漫談病態建築物症候群。家庭醫學與基層醫療，27(5)，161-165。
10. 社團法人台灣病態建築診斷協會(2018)。認識病態建築。取自：<http://www.twasbc.org/detail.php?docId=271>。
11. 建造業議會(2018)。被動式設計。取自：http://www.cic.hk/chi/main/zcb/ZCB_experience/passive_design/。
12. 徐筱琪(2012)。室內區域化舒適空調送風之節能評估。冷凍空調與能源科技雜誌，73，26-34。
13. 張倉榮、郭鴻興(2001)。以計算流體動力學分析自然通風低層建築物之通風特性-以溫室建築為例。農業工程學報，47(4)，55-66。
14. 張瑋如(2010)。室內空間一氧化碳擴散現象之 CFD 研究。國立臺灣科技大學建築研究所博士學位論文，未出版，臺北市。
15. 許正傑、陳嘉基、陳興璋(2011)。以數值模擬探討日式木造建築室內之自然通風。文化資產保存學刊，17，31-40。
16. 連奕輔(2012)。單相流體於仿生式楔形微流道中熱流行為之研究。私立中原大學機械工程學系碩士論文，未出版，桃園市。
17. 陳念祖、江哲銘、李彥頤、周伯丞(2001)。高架地板置換式自然通風對室內通風效率之影

- 響。國立成功大學建築學系碩士論文，未出版，臺南市。
18. 陳瑞鈴、朱佳仁、劉文欽、陳玠佑、姜柏帆、李勝雄(2012)。集合式住宅對建築物自然通風的影響。內政部建築研究所研究報告。新北市：內政部建築研究所。
 19. 閔凱(2007)。置換通風室內熱舒適性的數值模擬研究。製冷與空調，1，9-14。
 20. 楊振鋒、林信一、陳友剛(2004)。工業通風。新北市：高立圖書有限公司。
 21. 衛生福利部疾病管制署 (2025)。退伍軍人病。取自：
<http://www.cdc.gov.tw/professional/thema-net.aspx?did=664&treeid=cb31010f3835411a&nowtreeid=cb31010f3835411a>。
 22. 戴志青(2013)。瓦斯熱水器燃燒不完全造成室內一氧化碳累積之數值模擬。國立聯合大學環境與安全衛生工程學系碩士論文，未出版，苗栗縣。
 23. 謝志昌(2008)。混合通風系統對辦公空間通風效益影響之研究-以水平導風板搭配排風扇為例。國立成功大學建築學系碩士論文，未出版，臺南市。
 24. 簡裕榮、薛寧心(譯)(2004)。建築環境工學-修訂2版(原作者：田中俊六、武田仁、足立哲夫、土屋橋雄)。臺北市：六合出版社。
 25. Batog, P., & Badura, M. (2013). Dynamic of changes in carbon dioxide concentration in bedrooms. *Procedia Engineering*, 57, 175-182.
 26. Fu, X., & Wu, D. (2015). Comparison of the efficiency of building hybrid ventilation systems with different thermal comfort models. *Energy Procedia*, 78, 2820-2825.
 27. Song, J., & Meng, X. (2015). The improvement of ventilation design in school buildings using CFD simulation. *Procedia Engineering*, 121, 1475-1481.

