

遠東科技大學  
機械工程系碩士在職專班  
碩士論文

無冷氣教室使用吊扇通風之室內溫度分析

*Indoor temperature analysis for ceiling fan ventilation in a classroom  
without air-conditioning*

研究生:賴冠伶 Kuan-Ling Lai

指導教授:林建南 Chien-Nan Lin

中華民國 109 年 7 月

無冷氣教室使用吊扇通風之室內溫度分析

*Indoor temperature analysis for ceiling fan ventilation in a classroom  
without air-conditioning*

研 究 生：賴冠伶

指 導 教 授：林建南

遠東科技大學

機械工程系碩士在職專班

碩士論文

A Thesis Submitted to  
Department of Mechanical Engineering  
Far East University

July 2020

Hsin-Shih Dist., Tainan City, Taiwan, Republic of China

中華民國 109 年 7 月

遠東科技大學

碩士論文

無冷氣教室使用吊扇通風之室內溫度分析

Indoor temperature analysis for ceiling fan

ventilation in a classroom without

air-conditioning

研究生：賴冠伶

本論業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員

劉國聖 呂金生

林達南

指導教授：林達南

系(所)主管：朱清儀

中華民國 109 年 06 月 29 日

## 致謝

本論文得以完成，首先感謝林建南教授於學生研究所階段悉心的指導，提供我研究上專業的知識及分享您許多的寶貴經驗，並引導我論文方向，讓學生獲益匪淺，感謝您耐心的指導，在此對恩師致上最誠摯的敬意與謝意。

感謝口試委員呂金生教授、劉國基教授，於百忙之中抽空審查、不吝指教，對於學生的論文提供專業見解及建議，使本論文不足之處得以改正，在此亦表達誠摯的敬意與謝意。

感謝朱清俊教授、陳維方教授、廖德潭教授給予我許多學術上的知識與技術，讓我在研究所得以學習到多方的技能。

感謝 107 機械在職碩專班的成員，很高興有緣能與大家相遇，兩年研究生涯的互相照應及成長，點點滴滴都是我心裡的寶貴回憶。感謝蔡聰琪大哥、周玉茹……等人在課業上及論文上對我的幫助。感謝這一路幫助過我及鼓勵過我的人，謝謝大家。

最後要感謝我最愛的家人，謝謝您們在我研究所這兩年中給予我最強大的後盾。

賴冠伶 謹致  
109 年 7 月



# 無冷氣教室使用吊扇通風之室內溫度分析

研究生：賴冠伶

指導教授：林建南

遠東科技大學機械工程系碩士在職專班

## 摘要

本文探討小學普通教室，內部有 20 位學生，假設於六月下午 3 點、外界溫度為 32 度，利用商用軟體 ANSYS 進行模擬分析，無冷氣教室使用吊扇通風之溫度分析。

經由數值計算結果，發現在自然通風下，教室內的流場速度都保持在 0.3m/s 以下，屬於無感氣流狀態；而搭配吊扇使用後的教室流場擾動狀況比較明顯，整間教室的平均氣流速度也都能保持在 1m/s 以下，不會因為風速過快而造成風擊，因此上課的同學不會感到不舒服。

教室內的上氣窗開不開啟，對於室內通風效益是有影響的。而吊扇的配置也能達到改善教室的通風效果。其中，四座吊扇全部開啟影響教室內溫度分佈與氣流場最大，再來是開啟前面兩吊扇，或是開啟對角兩吊扇，最後才是開啟窗戶旁邊的兩吊扇。

自然通風下，教室內的溫度場分布平均，而搭配吊扇使用後的教室溫度場也能有效降溫。如果再搭配速度場的影響，體感溫度會因此下降，而提高學生在教室上課的舒適度。

關鍵字：自然通風、室內通風、吊扇

# **Indoor temperature analysis for ceiling fan ventilation in a classroom without air-conditioning**

Student : Kuan-Ling Lai

A d v i s o r : Dr. Chien-Nan Lin

Department of Mechanical Engineering

Far East University

## **ABSTRACT**

**This article explores the indoor air quality and the temperature analysis of a classroom where used ceiling fans without air-conditioning. The hypothesis of this study is about the ANSYS's simulation analysis of a primary school's classroom which has 20 pupils and the outdoor temperature of 32°C at 3:00 p.m. in June.**

**The study found the speed of flow field in the classroom is kept below 0.3m/s under the natural ventilation situation, the physical senses of airflow is near to have no feeling. On the other hand, the turbulence of airflow is more apparently in a classroom with ceiling fans. The average airflow velocity is kept below 1m/s, hence, students will not feel uncomfortable because of the steady wind speed.**

**The influence of indoor air quality and natural ventilation is very clearly if the window ventilators are closed in the classroom. The four ceiling fans' layouts can also improve the ventilation of the classroom. In particular, to open all ceiling fans will have the greatest impact on the indoor temperature and flow field in the classroom. Secondly impact is to open the two ceiling fans in front or at opposite corners. Lastly, the slight impact on the air turbulence is to open the two ceiling fans next to the open window.**

**The classroom's temperature can be decreased effectively by use of the ceiling fans**

**and its indoor temperature field is evenly under natural ventilation. Plus, the apparent temperature will drop when combined with the effects of the indoor velocity field, and the comfort level of the classroom will improve for these students.**



Keywords: natural ventilation, indoor ventilation, ceiling fan

# 目錄

致謝 .....	I
摘要 .....	II
ABSTRACT .....	III
目錄 .....	V
表目錄 .....	VIII
圖目錄 .....	IX
符號索引 .....	XIII
第一章 緒論 .....	1
1-1 研究背景 .....	1
1-2 研究動機 .....	1
1-3 研究目的 .....	2
1-4 研究問題 .....	2
1-5 研究流程架構 .....	3
1-6 研究限制 .....	3
第二章 文獻回顧與相關理論 .....	4
2-1 通風原理 .....	4
2-2 建築物通風方式 .....	4
2-3 通風換氣的目的 .....	6

2-4 室內空氣環境影響人體熱舒適的因子 .....	7
2-5 國內自然通風換氣相關研究 .....	9
第三章 研究設定 .....	12
3-1 教室空間模擬設定 .....	12
3-2 計算條件的設定與依據 .....	12
3-2-1 台南地區氣候特徵 .....	12
3-2-2 開口部型態 .....	14
3-3 數值模擬 .....	14
3-3-1 控制方程式 .....	14
3-3-2 邊界條件 .....	16
3-3-3 控制方程式之離散化 .....	17
3-3-4 數值方法 .....	17
3-3-5 收斂條件 .....	18
3-3-6 格點測試 .....	18
3-4 監控點的設定與依據 .....	18
第四章 結果與討論 .....	20
4-1 自然通風與搭配吊扇使用的室內流場與溫度場的分布狀況 ....	21
4-1-1 「case 1 和 case 6 速度場分布現象之比較」 .....	21
4-1-2 「case 2 和 case 7 速度場分布現象之比較」 .....	22

4-1-3 「case 3 和 case 8 速度場分布現象之比較」 .....	22
4-1-4 「case 4 和 case 9 速度場分布現象之比較」 .....	22
4-1-5 「case 5 和 case 10 速度場分布現象之比較」 .....	23
4-1-6 「case 1 和 case 6 溫度場分布現象之比較」 .....	23
4-1-7 「case 2 和 case 7 溫度場分布現象之比較」 .....	23
4-1-8 「case 3 和 case 8 溫度場分布現象之比較」 .....	23
4-1-9 「case 4 和 case 9 溫度場分布現象之比較」 .....	24
4-1-10 「case 5 和 case 10 溫度場分布現象之比較」 .....	24
4-2 上氣窗對室內通風效益之影響 .....	48
4-2-1 速度場分析 .....	48
4-2-2 溫度場分析 .....	56
4-3 吊扇配置對室內氣流環境、溫度分佈之影響 .....	63
4-3-1 教室內風速舒適性評估 .....	63
4-3-2 教室內溫度舒適性評估 .....	64
4-3-3 平均溫度相對百分比 .....	64
第五章 結論與建議 .....	66
5-1 結論 .....	66
5-2 建議與未來方向 .....	67
參考文獻 .....	68



## 表目錄

表 2-1 通風換氣的目的與其影響因子(王錦堂[2]).....	7
表 2-2 風速對人體及作業之影響(賴榮平[4]).....	8
表 3-1 1981~2010 年 台南月平均溫度 .....	13
表 3-2 2017~2019 年 台南月平均溫度 .....	13
表 3-3 2017~2019 年 台南月平均最高溫度.....	13
表 3-4 國小學童平均身高調查表 .....	19
表 4-1 本研究數值模擬各模組代號說明 .....	21
表 4-2 室內風速舒適性評估基準值 .....	63

## 圖目錄

圖 1-1 研究流程圖.....	3
圖 2-1 貫流通風示意圖.....	5
圖 2-2 浮力通風示意圖.....	5
圖 2-3 混合換氣示意圖.....	6
圖 3-1 教室空間模擬圖.....	12
圖 4-1 教室空間模擬圖(a)教室空間示意圖(b)教室內部 X 平面示意圖 .....	21
圖 4-2 case1、case6 的速度場分布圖(a)教室速度場流線圖(b)不同 Y 截面位置之速度分布圖.....	26
圖 4-3 case 2、case 7 速度場分布圖(a)教室速度場流線圖(b)不同 Y 截面位置之速度分布圖(c) 不同 X 截面位置之速度分布圖(d) 不同 Z 截面位置之速度分布圖.....	28
圖 4-4 case 3、case 8 速度場分布圖(a)教室速度場流線圖(b) 不同 Y 截面位置之速度分布圖(c) 不同 X 截面位置之速度分布圖(d) 不同 Z 截面位置之速度分布圖.....	30
圖 4-5 case 4、case 9 速度場分布圖(a)教室速度場流線圖(b) 不同 Y 截面位置之速度分布圖(c) 不同 X 截面位置之速度分布圖(d) 不同 Z 截面位置之速度分布圖.....	33



圖 4-6 case 5、case 10 速度場分布圖(a)教室速度場流線圖(b) 不同 Y 截面位置之速度分布圖(c) 不同 X 截面位置之速度分布圖(d) 不同 Z 截面位置之速度分布圖 .....	36
圖 4-7 case 1、case 6 的不同 Y 截面位置之溫度場分布圖 .....	37
圖 4-8 case 2、case 7 溫度場分布圖(a) 不同 Y 截面位置之溫度分布圖(b) 不同 X 截面位置之溫度分布圖 (c) 不同 Z 截面位置之溫度分布圖 .....	39
圖 4-9 case 3、case 8 之溫度分布圖(a) 不同 Y 截面位置之溫度分布(b) 不同 X 截面位置之溫度分布(c) 不同 Z 截面位置之溫度分布 .....	41
圖 4-10 case 4、case 9 之溫度分布圖(a) 不同 Y 截面位置之溫度分布(b) 不同 X 截面位置之溫度分布(c) 不同 Z 截面位置之溫度分布 .....	44
圖 4-11 case 5、case 10 之溫度分布圖(a) 不同 Y 截面位置之溫度分布(b) 不同 X 截面位置之溫度分布(c) 不同 Z 截面位置之溫度分布 .....	47
圖 4-12 各案例之 CFD 數值解析之不同 Y 截面速度場結果(a)case 1 ~ case 5(b)case 6 ~ case 10 .....	51
圖 4-13 各案例之 CFD 數值解析之不同 X 截面速度場結果(a)case 1 ~	

case 5(b)case 6 ~ case 10 .....	52
圖 4-14 各案例之 CFD 數值解析之不同 Z 截面速度場結果(a)case 1 ~ case 5(b)case 6 ~ case 10 .....	53
圖 4-15 case 1、case 6 速度場數值比較.....	54
圖 4-16 case 2、case 7 速度場數值比較.....	54
圖 4-17 case 3、case 8 速度場數值比較.....	54
圖 4-18 case 4、case 9 速度場數值比較.....	55
圖 4-19 case 5、case 10 速度場數值比較.....	55
圖 4-20 各案例之 CFD 數值解析之不同 Y 截面之溫度曲線圖(a)case 1 ~ case 5 (b) case 6 ~ case 10 .....	58
圖 4-21 各案例之 CFD 數值解析之不同 X 截面溫度場結果(a)case 1 ~ case5 (b) case 6 ~ case 10 .....	59
圖 4-22 各案例之 CFD 數值解析之不同 Z 截面溫度場結果(a)case 1 ~ case5 (b) case 6 ~ case 10 .....	60
圖 4-23 case 1、case 6 的溫度場數值比較.....	61
圖 4-24 case 2、case 7 的溫度場數值比較.....	61
圖 4-25 case 3、case 8 的溫度場數值比較.....	61
圖 4-26 case 4、case 9 的溫度場數值比較.....	62
圖 4-27 case 5、case 10 的溫度場數值比較.....	62

圖 4-28 風速舒適性比較圖 ..... 64

圖 4-29 開啟上氣窗和採光窗的教室平均溫度長條圖 ..... 65

圖 4-30 只開啟採光窗的教室平均溫度長條圖 ..... 65



## 符號索引

$E$	總能 ( $J$ )
$\bar{h}$	熱對流係數 ( $W/m^2 \cdot K$ )
$i, j, k$	$x, y, z$ 軸方向之分量
$I$	單位張量
$\dot{m}$	質量流率 ( $kg/s$ )
$p$	靜壓 ( $Pa$ )
$Q$	熱傳量 ( $W$ )
$S_{ij}$	平均應變率 (Mean rate-of-strain tensor) ( $1/s$ )
$T$	溫度 ( $^{\circ}C, K$ )
$\bar{T}_{out}$	壓力出口平均溫度
$u_x, u_y, u_z$	沿 $x, y, z$ 軸方向之流速 ( $m/s$ )
$x, y, z$	卡氏座標
希臘符號	
$\varepsilon$	紊流能量散失率 ( $m^2/s^3$ )
$\kappa$	紊流動能 ( $J/kg$ )
$l$	紊流特徵長度 ( $m$ )
$\mu$	黏性係數 ( $Pa \cdot s$ )
$\mu_{eff}$	等效黏度 ( $Pa \cdot s$ )
$\mu_t$	紊流黏度 ( $Pa \cdot s$ )
$\bar{v}$	整體速度 ( $m/s$ )
$\rho$	密度 ( $kg/m^3$ )
$\bar{\tau}$	應力張量 ( $Pa$ )

$\rho_o$       室外空氣密度( $kg/m^3$ )

$\rho_i$       室內空氣密度( $kg/m^3$ )



# 第一章 緒論

## 1-1 研究背景

早在 1992 年，聯合國於巴西里約召開了地球高峰會，當時邀請了一百多個國家的政府代表，共同商議討論挽救地球環境危機的對策，並揭示了因為二氧化碳大量排放，嚴重破壞地球環境，所導致海平面升高、南北極冰層融化、全球暖化、土地沙漠化及氣候異常等現象。進而簽署了「氣候變化綱要公約」、「二十一世紀議程」、「里約宣言」等重要約定。次年聯合國也成立了「永續發展委員會」，展開全面性的地球環境保護運動。

接著，又於 1997 年聯合國氣候變化委員會於京都召開會議，簽署「京都議定書」，正式要求美、英、日等國家承諾降低二氧化碳排放，此係首度納入國際文件成為具有法律約束力的約定，採取貿易報復手段，進行二氧化碳減量之管制。2002 年更在南非的約翰尼斯堡召開「世界永續發展高峰會」，並針對水資源、能源、人類健康、農業與生物多樣性等五大優先議題，提出人類與環境共生關係可量化的行動指導綱領，以落實永續發展的策略。

我國行政院亦自 1997 年起成立「國家永續發展委員會」，並積極參與永續發展的相關議題，「永續發展」因此而蔚為全民運動。這些都在在顯示了地球環境保護的問題已經成為國際間的重要事務，同時也顯示「永續發展」已成為人類最重要的課題。

## 1-2 研究動機

學校是提供兒童學習的主要教學場域，兒童早上七點多到學校，一直待到五點多才放學回家，留在學校學習的時間幾乎佔了將近十小時了，因此校園環境與教室內教學空間品質也成了影響兒童身心健康發展的重要場域。

溫室效應導致全球暖化，各地氣溫不斷屢創新高，學生在悶熱的教室上課，情緒容易煩躁不安、難以專注，老師也受不了在炎熱的天氣中上課，因此紛紛有「教室裝設冷氣空調設備」的聲音出現，但是裝設空調設備除了耗費龐大經費之外，也是屬於高耗能設備，



跟政府推行的永續發展、環境保護議題及節能省碳的政策相違背，因此大部分的小學普通教室採用自然通風及配合風扇運作，來降低室內環境溫度，以營造安全舒適的校園環境。

### 1-3 研究目的

本研究目的主要是透過現有學校普通教室在無空調設備下進行模擬測量，以探討普通教室自然通風設計，搭配風扇使用下教室內溫度場及氣流場的變化情形，以了解學校普通教室在無使用空調狀態之下是否能符合規範標準，讓兒童在學校有舒適的學習環境與品質。其結果可作為將來學校重新設計時的考量依據，也可作為探討普通教室節能省電的重要參考依據。

### 1-4 研究問題

本研究以小學普通教室為研究對象，教室空間為面寬 900 公分、淨深 750 公分、高度為 350 公分。教室兩側採光窗戶為橫拉窗(高 110 公分、寬 120 公分)，上氣窗亦為橫拉窗(高 90 公分、寬 120 公分)，單邊走廊、前後門都為單開門(200 公分 X 90 公分)，教室內有 4 支吊扇(120 公分 X 120 公分 X 10 公分)，10 張桌子(長 100 公分、寬 90 公分、高 60 公分)、兩位學生一桌。本研究問題如下：

- 一、 探討自然通風與搭配吊扇使用的室內流場與溫度場的分布狀況
- 二、 探討有無開啟上氣窗對室內通風效益之影響
- 三、 探討吊扇配置對室內溫度分布、氣流環境之影響

## 1-5 研究流程架構



圖 1-1 研究流程圖

## 1-6 研究限制

在現實生活中自然環境的複雜程度與多變性極高，想要完全由電腦模擬真實狀況，不但需要耗費龐大的時間，以及添購精密的電腦軟體設備，更可能因此喪失了其可以應用的價值。所以本文對於桌面空間複雜問題設定，有給予簡單化，但仍保持原有特徵。完全模擬自然環境的真實狀況是無法進行疊代運算，所以會針對所要探討的計算範圍進行選定及設定。



## 第二章 文獻回顧與相關理論

### 2-1 通風原理

通風可依其驅動力來源區分為自然通風 (natural ventilation) 與機械通風 (mechanical ventilation)。自然通風是依靠建築物內外的氣壓差異或溫度差異所造成的空氣流動；機械通風又稱為強制通風 (forced ventilation)，利用通風機械 (風扇、送風機、抽風機) 所產生的動力促使室內外的空氣交換和流動。機械通風適用於自然通風量不足或室內會產生有害或可燃氣體，其優點為風量穩定，且可隨需要來控制通風量，但缺點為消耗能量。

自然通風又可分為風壓通風與浮力通風，風壓通風 (wind-driven ventilation) 依靠自然風力作用在建築上所造成的風壓差異，造成空氣流動與室內外的空氣交換；浮力通風 (buoyancy-driven ventilation) 則藉由空氣溫度差異所造成的浮力，促使空氣上下對流、交換。

機械通風又可分為正壓通風，負壓通風和平衡通風 (balance supply & extract)。正壓通風採用機械送風和自然排風的通風模式；負壓通風採用自然送風和機械排風的通風模式；平衡通風採用機械送風和機械排風的通風模式。

### 2-2 建築物通風方式

戶外風速超過 1.5m/s 時，即可促成自然的通風，其通風量依室內空間的型態、佈局及開口部之開設情形而頗有出入。而建築物室內、外之壓力變化除受外型影響外，亦與開口的位置與數量有關。其原理包括利用溫度差、風力以及混合的方式進行換氣，以下說明之：

[1]

#### (一) 貫流通風

利用自然風力作用在建築上所造成的風壓差異，使得建築物內外的空氣進行交換。當風撞擊建築物時，建築物迎風面為正壓區，背風面為負壓區。若迎風面和背風面皆有開口 (門窗)，則迎風面的開口為進風口，而背風面的開口為排風口。若僅迎風面有開口或僅背

風面有開口亦可造成自然通風，但通風效率不及迎風面和背風面皆有開口者。若迎風面和背風面的開口正對著風向則容易造成穿堂風，其通風效果最佳，如下圖 2-1 所示。

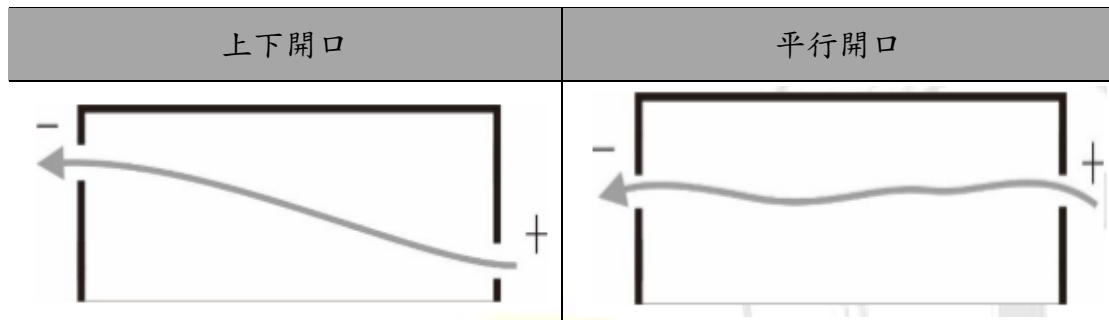


圖 2-1 貫流通風示意圖

建築表面所受之壓力常以風速壓 (Velocity Pressure)  $V_p$  表示之，其計算公式如下。 $V$  為風速(m/s)； $\rho$  為空氣密度 (1 大氣壓、溫度為  $20^{\circ}\text{C}$  狀況下) 其密度為  $1.2(\text{kg}/\text{m}^3)$ 。

$$V_p = \frac{\rho v^2}{2} \text{ (pa)} \quad (1-1)$$

依流體力學原理，流經門窗之大型開口的通風量  $Q$  如下所示。其中， $\alpha$  為風量係數； $A$  為開口面積( $\text{m}^2$ )； $\Delta p$  為室內外壓力差值(Pa)； $\rho$  為空氣密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

$$Q = \alpha \cdot A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \text{ (}\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\text{)} \quad (1-2)$$

## (二)浮力通風

是利用空氣溫度差異所形成之浮力促使空氣上下對流，熱壓差與「進出風口之高差」及「室內外溫差」有關，室內外溫差與進出風口之高差越大，則熱浮力作用越明顯。如圖 2-2 所示。

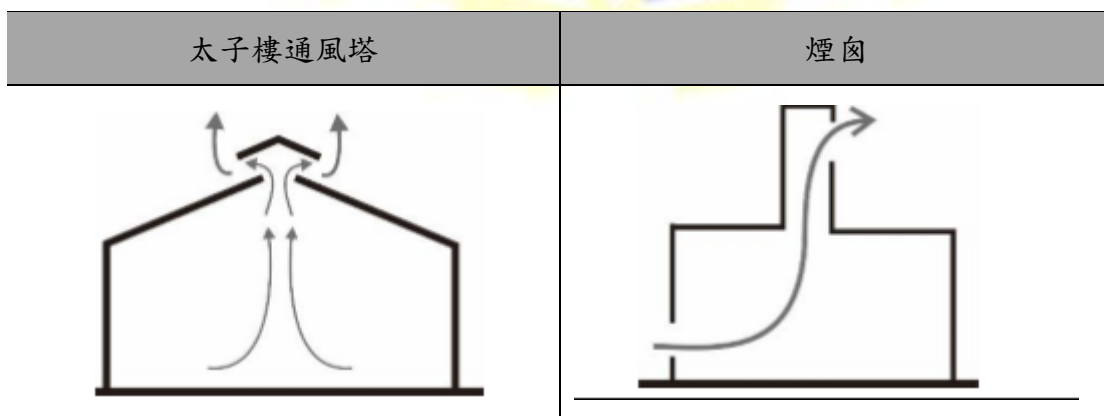


圖 2-2 浮力通風示意圖

熱浮力通風依其進出風口之高差及室內外溫差之關係而影響效果，則其浮力通風量  $Q_b$  之計算公式可由下列所示。 $\alpha$  為風量係數； $A$  為開口面積( $m^2$ )； $g$  為重力加速度( $m/s^2$ )； $h$  為上下開口高度差( $m$ )； $\rho_o$  為室外空氣密度( $kg/m^3$ )； $\rho_i$  為室內空氣密度( $kg/m^3$ )。

$$Q_b = \alpha \cdot A \sqrt{\frac{2gh(\rho_o - \rho_i)}{\rho_i}} \quad \left(\frac{m^3}{s}\right) \quad (1-3)$$

### 三、混合(重力與風力)換氣

利用自然風的自然換氣，由於受到自然風變動之影響，所以無法維持一定的換氣量，且如果無風的狀態時，便只能依靠溫度差來進行換氣，而一般之建築物則會同時受到溫度差與風力之影響，因此，採用混合(重力與風力)之換氣方式，則更可以有效的達到換氣量。但由於重力(溫度差)之換氣會持續進行，而風力換氣則僅在有風的時候發生，若兩者同時作用時需考慮兩者換氣路徑之配合，若兩者的路徑相反，換氣效果則會因壓力相抵而減少，如圖 2-3 所示。

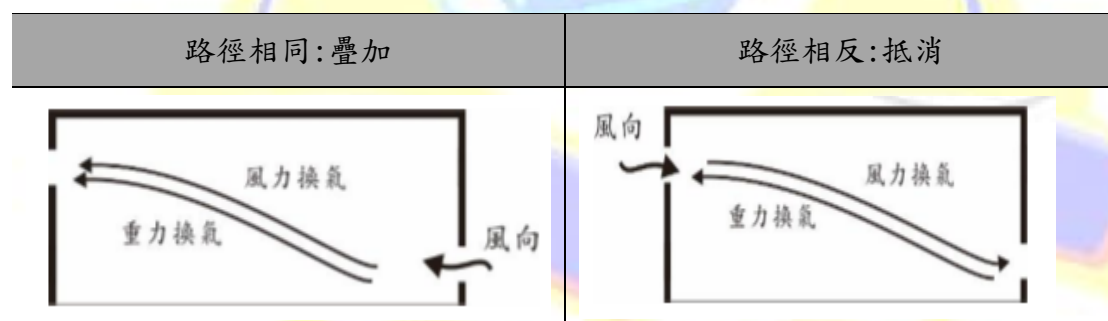


圖 2-3 混合換氣示意圖

## 2-3 通風換氣的目的

建築物室內通風換氣的目的，是讓在建築空間中使用的人員或是運轉的機器能夠得到最適宜的環境，以維護其健康或是發揮其最大運轉的效能。因此，非空調型的建築物，最常運用自然通風換氣的方式，藉此改變室內空氣的溫度、濕度、氣流分布及改善通風路徑，以確保該空間使用時的舒適性之目的。通風換氣的目的與其影響因子綜合整理如下表 2-1:

表 2-1 通風換氣的目的與其影響因子(王錦堂[2])

目的	影響因子	
1. 提供新鮮的空氣以維持室內空氣之衛生(健康與衛生)	1. 細菌、黴菌	冬季時探討
	2. 煙塵、浮游微粒(PM10) 粉塵	
	3. 水蒸氣及其他氣體	
	4. 化學物產生之臭氣及人體體臭	
	5. 各種揮發性有機化合物(VOCs)	
2. 降低/提高室內溫度與濕度，讓使用者感到舒適(居室舒適性)	1. 溫度之調節(帶走熱量)	
	2. 濕度之調節	
3. 以氣流降低/提高，滿足人體之舒適感(人體舒適)	1. 以無感氣流為標準	以冬季為主
	2. 以有感氣流為標準	以夏季為主

## 2-4 室內空氣環境影響人體熱舒適的因子

影響室內空氣環境因子，主要有溫度、濕度、風速、污染物的濃度，物理性因子(溫度、濕度、氣流)對於人體健康並不會造成直接的衝擊，但會使人感到不適，而污染物則有可能對人體產生傷害(蘇慧貞[3])

### 一、溫度

大氣之溫度即稱之為氣溫(Temperature)。影響人類生活的氣候要素之中，以氣溫最為重要。室外氣溫的變化，對建築物室內溫濕環境有很大的影響，也就是說會影響到室內人員的舒適性。長期處於高溫之環境下亦產生疲勞、倦怠活動力降低等影響。

### 二、濕度

用以表示空氣中所含有水蒸氣量的大小稱為濕度，濕空氣中的水蒸氣量，可用絕對溼度、相對濕度與水蒸氣分壓表示。一天之中濕度的變化有一定的傾向，通常一天之內空氣中的水蒸氣量(絕對溼度)不會有太大變化。至於相對濕度則與氣溫變化成相反傾向，通常在氣溫最低的清晨時相對溼度升至最高，在最高溫的午後二到三時左右相對濕度降至最低。過低的溼度可能造成皮膚乾裂、眼睛乾澀及呼吸道搔癢等症狀，反之，過高的溼度則可能造成皮膚濕黏、出汗，使人體感到不舒適等狀況，



但對於人體健康之危害則較為輕微。

### 三、風速

自然通風是直接與建築外牆開口進行接觸，建築開口設計上應考量風速的變因，避免產生風速過大而對人體有不舒適的影響，賴榮平[4]提出風速對人體及作業之影響，人體對風速的感知各有差異，一般約在 0.5m/s 以上就能感覺到風，理想的風速宜限制在 1m/s 以下，倘若風速逾 1.5m/s 以上，會有風擊的感覺，人體會感到不舒服，如表 2-2 所示：

表 2-2 風速對人體及作業之影響(賴榮平[4])

風速大小	對人體及作業之影響
0~0.3 m/sec	不易察覺
0.3~0.5 m/sec	愉快，不影響工作。
0.5~1.0 m/sec	一般愉快，但需提防薄紙被吹散(如稿紙)
1.0~1.5 m/sec	稍有風擊及令人討厭之吹襲，草面紙張吹散。
1.5~7.0 m/sec	風擊明顯，薄紙吹揚，厚紙吹散。若欲維持良好之工作效率及健康條件，需改正適當之風量及控制風的路徑。

### 四、汙染物

汙染物依照空氣汙染物之性狀，可分成氣狀與顆粒汙染物兩大類，其中氣狀汙染物又可分成有機汙染物及無機汙染物。有機汙染物包括一氧化碳、二氧化碳、懸浮微粒、二氧化氮、二氧化硫、臭氣、甲醛和揮發性有機物等。粒狀汙染物可分成固體與氣體懸浮微粒，其中固體微粒又可區分成生物性與非生物性氣膠微粒。生物性氣膠微粒包含花粉、微生物、昆蟲及其排泄物等；非生物性氣膠微粒則包含一般懸浮微粒、纖維粒狀物等。而室內主要汙染物，若依照汙染物來源，美國國家安全衛生研究所(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)歸納出外氣滲入、室內人員、空調系統、建築材料、有機物質與事物器具與用品等來源會產生室內空氣汙染物(蘇慧貞[3])

## 2-5 國內自然通風換氣相關研究

自然通風換氣的研究，多以辦公室、臥室、教室等地點採用「現場實測」、「實驗室足尺實驗」、「風洞實驗」與「CFD 模擬技術」等方法探討，如下所示：

謝志昌[5]運用 CFD 數值模擬解析方式，模擬辦公室單元空間之室內溫度、氣流場、污染物濃度場分佈之情況，研究結果顯示，水平導風板裝設於高低窗模式，設定之通風量越大，需搭配較少風扇組數，降溫效果最顯著，平均降低 2.3%；且於各通風量模組搭配風扇組數兩組，對室內污染物濃度移除效果最顯著，高於無裝設排風扇。

陳鵬宇[6]以應用計算流體動力學數值運算，並以實驗室實測檢討印證，探討在自然通風換氣方式下，單元臥室空間室內空氣環境影響因子之一『氣流』分布之模式。其結果顯示，人體就寢時頭部區域平均風速隨開窗位置移動而有增加之趨勢。其中，開窗位置在最右側 180cm 處，室外風速對室內人體就寢頭部區域平均風速的影響最大，而室外風速影響最小者躺臥呼吸帶為 120cm 處，坐姿與站立則為 90cm 處。

徐偉森[7]依臥室實驗場實體尺寸模型，建構 CFD 電腦模擬的臥室室型，以進行不同開窗率、開窗寬度與床鋪擺向之下的 32 組濃度衰減實驗。研究結果，在完全自然通風的狀態下，開窗寬度增加時邊界污染物回流現象也相對增加，臥室開窗寬度增為 20cm 時，室內溫度平均可降低 0.2°C。臥室室內於頭部熱源產生「熱柱」的兩側會形成兩股對稱的環流，中間則形成一軸面，此軸面的位置可決定室內空氣環境的分布狀態。其中以頭部最靠近窗戶側時，對溫度與 CO<sub>2</sub> 濃度的降低最為顯著。在熱浮力影響下，室內平均溫度最高可上昇 2°C，CO<sub>2</sub> 的濃度會累積在天花板下方處，最高濃度可達 880ppm，而開窗邊界的 CO<sub>2</sub> 濃度在開窗寬度增加時會有回流的現象，可證明室內熱浮力與外氣強度的大小決定了污染物在開窗邊界進出的行為。

林宏駿[8]應用計算流體力學電腦模擬解析，探討國小體育館自然通風開窗位置與型式對室內流場之影響。其結果為，風力與熱浮力之通風效果隨著室內熱源的增加，因入風風速之差異越大，促使空氣流動通風效果有明顯的改善效果。開窗的位置亦對於室內流場速度產生了影響，就單層開窗而言，下層開窗模式對於體育館空間的流場速度明顯優於上

層開窗模式，且開窗尺寸為開大窗的模式擁有較佳之室內溫熱環境。而雙層開窗下，體育館空間最佳室內溫熱環境模式為上層、下層皆需要開大窗。雙層開窗模式混合了建築自然通風原理中熱浮力通風及貫流通風，將室內溫熱環境達到符合人體舒適狀態，而雙層開窗尺寸對於室內平均溫度則差異不大，不論開一般窗或是落地窗模式皆擁有不錯的流場速度及溫熱環境。因此若要以自然通風之方式改善室內環境品質，則需同時考量風力與浮力通風，藉以提升氣流流動與效能。

翁國揚[9]應用計算流體力學探討在外風速為 0.5m/s 下，國小普通教室開口部因子對室內流場之影響。其結果為，當出風面積控制在 4.32 平方公尺時，進風面開窗面積越小，其進風風速越大，將開窗高度提高 20 公分，也會有類似效果；在開窗形式方面，上下拉窗的平均風速最大，折疊推開窗的平均風速最小，另外活動百葉的設置會減弱風速進入室內；在遮陽板因素方面，設置上部遮陽與導光板形式的遮陽板會降低室內平均風速約 15%，若增加遮陽板與建築外殼之間的開縫深度 60 公分時，則室內平均風速會再回復接近不設遮陽板時的數值；加入課桌及人體因素之後，室內平均風速大為降低，且室內氣流場也較為均佈。

楊武泰[10]以國民中小學普通教室氣流環境為研究對象，運用 CFD 數值模擬解析方式探討校舍在貫流通風作用下，建築物座向、走廊形式與深度、遮陽形式與深度、開窗形式與位置、護欄形式對於教室內（老師授課區與學生上課區）與教室外（走廊活動區）氣流環境的影響。其結果顯示：單邊走廊型校舍在東風吹拂下，建築物的座向以南北向優於東西向。

吳印浴[11]以教室室內空氣品質為出發點，探討何種排風扇配置模式及風量為較佳之使用方式，以達到「健康性」、「舒適性」之目的。其結果顯示，在自然通風下，當風速大於 2m/s 時，利用雙層屋頂屋脊口開啟自然通風之方式可達到室內之健康性，使室內 CO<sub>2</sub> 濃度維持在 1000ppm 以下。當風速小於 2 m/s 時，可利用混合通風之排風扇設備輔助，使室內 CO<sub>2</sub> 濃度能夠維持在 1000ppm 以下。裝設排風扇其室內呼吸區域平均溫度皆小於無裝設排風扇，且能有效移除室內污染源。當教室使用人數為 30 人，經過 25 分鐘後，室內

CO<sub>2</sub> 濃度即會超過 1000ppm，因此建議於上課後 25 分鐘左右即可開啟排風扇。

陳玟秀[12]以小學普通教室為研究對象，利用「現場實測」掌握實態，並採用「CFD 模擬」了解下氣窗開口因子對室內氣流之影響。其結果顯示，開啟下氣窗有助於室內氣流均佈，但呼吸帶氣流減弱。進風口「大」比「小」在室內 0.4m 高程處之風速高出 0.16m/s；而在呼吸帶以上高程處：進風口大小幾無影響，彼此間最大相差不超過 0.08m/s。窗戶「全開」的方式其室內氣流較為均佈，且能維持氣流強度到達出風口，並有助於減少室內熱量累積。在「不開採光窗」的狀態下，開啟「上、下氣窗」之開窗方式，也能有效減少燈具與人體熱量累積。





## 第三章 研究設定

本研究範圍乃針對教室不同開口部搭配風扇使用，以 CFD 紊流數值模型之電腦解析預測進行分析，透過邊界條件設定模擬氣流場與溫度場之結果，進行教室內開窗方式搭配吊扇使用之研究。

### 3-1 教室空間模擬設定

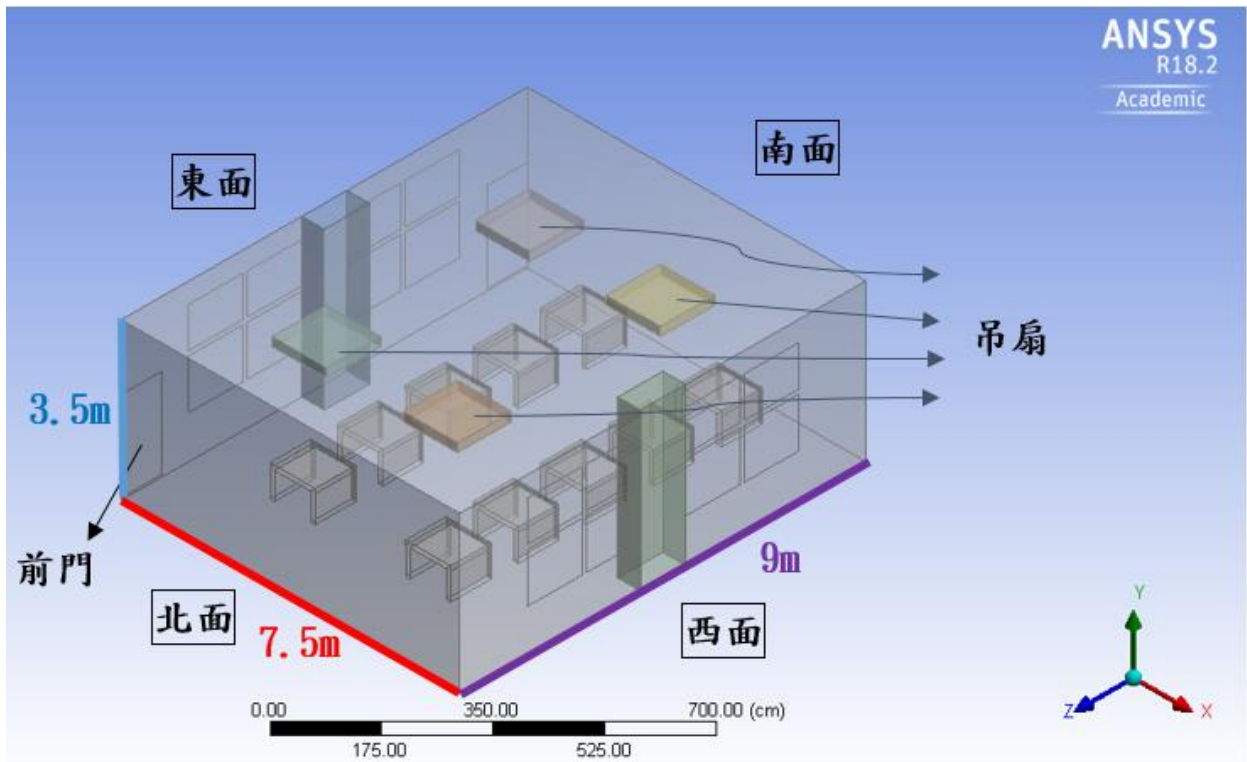


圖 3-1 教室空間模擬圖

本研究以小學普通教室為研究對象，教室空間為面寬 9m、淨深 7.5m、高度為 3.5m。教室兩側採光窗戶為橫拉窗(高 110 公分、寬 120 公分)，上氣窗亦為橫拉窗(高 90 公分、寬 120 公分)，單邊走廊、前後門都為單開門(200 公分 X 90 公分)，教室內有 4 支吊扇(120 公分 X 120 公分 X 10 公分)，10 張學生桌子(長 100 公分、寬 90 公分、高 60 公分)。

### 3-2 計算條件的設定與依據

#### 3-2-1 台南地區氣候特徵

臺南市全境位於北回歸線之南，屬副熱帶季風氣候與熱帶氣候的過渡帶，依照國際通用的柯本氣候分類法台南屬於副熱帶氣候，全年溫和少雨、日照充足，全年日照時數 2180.8

小時。大陸冷氣團南下侵臺時，容易降至 10°C 上下，日夜溫差明顯。受季風及地形影響，降雨如熱帶般乾濕季分明，雨量多集中於五到九月夏季，主要因鋒面及季風影響，佔全年降雨量 80% 以上，且西南季風盛行及對流作用，午後易生局部性對流雨，但太平洋高壓強時亦會出現長達整個月的夏旱。夏季為颱風易發生時期，冬季水氣不足則為旱季。年平均降雨量約 1570 公厘，降雨日數平均全年約有 94 日，8 月即佔約 16.2 日。以下表格分別為表 3-1 1981~2010 年台南月平均溫度、表 3-2 2017~2019 年台南月平均溫度、表 3-3 2017~2019 年月平均最高溫度。

表 3-1 1981~2010 年 台南月平均溫度(°C)

	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
溫度	17.6	18.6	21.2	24.5	27.2	28.5	29.2	28.8	28.1	26.1	22.8	19.1

表 3-2 2017~2019 年 台南月平均溫度(°C)

	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
2017	19.4	18.6	21.5	24.6	27.7	29.3	29.6	29.9	30	27.1	23.8	19.1
2018	18.1	17.5	22.3	25.6	28.9	29	29.2	27.8	28.9	25.8	24.2	21.6
2019	19.7	22	22.5	26	26.9	29.3	29.2	28.7	28.4	27.1	23.5	19.8

表 3-3 2017~2019 年 台南月平均最高溫度(°C)

	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
2017	28.1	29	30.2	32.3	33.9	34.5	34.5	34.9	35.4	35.4	33.4	26.5
2018	28.2	30.6	31.2	32.5	34.2	32.5	35.2	34.4	34	31.7	31.3	30.5
2019	28.9	31	30.7	32.9	33.9	34.6	35.4	34.6	33.9	33	31.6	28.9

由以上的表格統計結果，發現月平均溫度有逐年增高的趨勢，夏季月平均溫度達到 30 度，而近三年的月平均最高溫度也達到 35 度，因此本研究將模擬夏季六月時的氣溫，並將溫度設定為 32 度。

### 3-2-2 開口部型態

開口部分為門和窗戶，門有前、後門都是單開門、窗戶則為上氣窗和採光窗，由於模擬的季節為夏季，因此在正常狀況下，教室應該都是開啟門窗的，因此設定前後門及兩邊窗戶都是開啟的；另外筆者發現大部分的教室雖然有上氣窗，但卻經常是關閉的，因此也設定只開採光窗而不開上氣窗的狀況，來探究開不開上氣窗是否對教室內的氣流場、溫度場有所影響。

### 3-3 數值模擬

本文使用以建立在流體力學與數值計算方法為基礎，所使用之套裝軟體FLUENT，進行模擬教室內開窗方式搭配吊扇使用之氣流分析以及溫度場的分布狀況。針對此研究所用到的數值計算與離散方法做一解析，並對網格做測試。

#### 3-3-1 控制方程式

##### 基本假設

1. 將太陽輻射動態負荷簡化為下午 3:00 之日照負荷，教室非邊間，單面(西面牆)及屋頂有日照負荷，其他無日照負荷。
2. 以穩態分析室內溫度變化。
3. 空氣除了密度以外，均假設為常數，以不可壓縮流體計算。
4. 本研究的流場假設流動為三維紊流流場(turbulent flow)。

基於以上基本假設，一般流場均是以納維爾-史都克(Navier-Stokes)方程式來描述流體運動現象，對紊流方程式之物理量使用時間平均(time average)之觀念，統御方程式可分別以張量(tensor)的型式表示如下：

連續方程式(continuity equation)

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_i}} = 0 \quad (3-1)$$

動量方程式 (momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \rho (\overline{u_i u_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right] \quad (3-2)$$

能量方程式 (energy equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \rho c_p (\overline{u_i T}) = \overline{u_j} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \overline{u_j'} \frac{\partial \bar{p}'}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j' T'} \right) \quad (3-3)$$

其中  $\overline{u_i' u_j'}$  為雷諾應力 (Reynolds stress)， $\overline{u_j' T'}$  為雷諾熱通量 (Reynolds heat flux)，

$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$  為有效黏滯係數。

### 紊流模式

一般常用的數值預測紊流模式是  $k-\varepsilon$  雙方程式紊流模式， $k$  是紊流動能 (turbulent kinetic energy)， $\varepsilon$  是紊流能量散失率 (turbulent energy dissipation rate)。標準  $k-\varepsilon$  紊流模式 (standard  $k-\varepsilon$  model)，是藉由 Navier-Stokes equation 所推導，其半經驗公式是基於流場為完全紊流的假設所導出。為此標準  $k-\varepsilon$  紊流模式適用於完全紊流流場，而對其他不同的紊流場形式，都能被廣泛的接受。故本文採用 standard  $k-\varepsilon$  紊流模式來模擬流場。

$k-\varepsilon$  方程式如下：

紊流動能  $k$  傳輸方程式 (turbulent kinetic energy  $k$  transport equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3-4)$$

紊流耗散率  $\varepsilon$  傳輸方程式 (turbulent energy dissipation rate  $\varepsilon$  transport equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3-5)$$

其中  $C_\mu = 0.09$ ， $C_1 = 1.44$ ， $C_2 = 1.92$ ， $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ，為經驗係數， $\mu_t$  是紊流黏度 (turbulence viscosity)， $\sigma_k$  是動量動能擴散率與紊流動能擴散率之比 (Prandtl number for turbulent kinetic energy)， $\sigma_\varepsilon$  是動量動能擴散率與紊流能量散失率之比 (Prandtl number for turbulent energy dissipation rate)。  $G_k$  是由平均速度梯度所產生的紊流動能，定義



為

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3-6)$$

以布氏假設(Boussinesq hypothesis)去評估  $G_k$  在某種程度上的一致性，則

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (3-7)$$

其中  $S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$  為平均應變率張量係數(the modulus of the mean rate-of-strain tensor)， $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  為平均應變率張量(mean rate-of-strain tensor)。

而雷諾應力是採用布氏渦流黏滯觀念(Boussinesq eddy viscosity concept)，布氏將雷諾應力類比於層流流動之應力與應變率關係的型式，定義為

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3-8)$$

其中：

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-9)$$

至於能量方程式之雷諾熱傳量項，則類比於雷諾應力項之層流化之處理，將雷諾熱傳量定義為

$$-\overline{\rho u'_j T'} = \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad (3-10)$$

$\sigma_t$  是溫度擾動的時間尺度與速度擾動的時間尺度的比值，通常  $\sigma_t$  的值為 1.0。

### 3-3-2 邊界條件

本研究邊界條件設定如下：

1. 溫度: 研究設定為夏季六月、外界乾球溫度 32°C。
2. 日照面外氣溫度: 有受到太陽直接照射的玻璃面與牆面的情形，根據輻射等效溫度設為

等效外氣溫度。[14]

$$t_e = t_o + \alpha G_t / h_o - \varepsilon \delta R / h_o \quad (3-11)$$

其中  $\alpha$  為接收面吸收率,  $G_t$  太陽照射於接收面的總輻射熱,  $h_o$  為等效熱對流係數,  $\varepsilon \delta R / h_o$  為修正項垂直面為  $3.9^\circ\text{C}$ , 水平面為  $0^\circ\text{C}$ 。以近三年的 6 月平均溫  $30^\circ\text{C}$  和 6 月最高溫  $35^\circ\text{C}$  的平均溫度  $32^\circ\text{C}$  為基準, 而其所計算  $G_t$  約為  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $\alpha$  以 0.5 估算, 等效外氣溫度約為  $58^\circ\text{C}$ 。屋頂面則以  $G_t$  約為  $900 \text{ W/m}^2$  估算。等效外氣溫度約為  $57^\circ\text{C}$ 。玻璃部分因輻射熱直接入設於室內, 會造成室內地板及桌面產生熱吸收與熱輻射效應, 是動態負荷, 為計算方便起見, 一樣以牆面方式設等效外氣溫度。

3. 人員發熱量: 以 2 人總發熱量  $200 \text{ W}$  估算。將此發熱量設於桌面熱通量為  $222 \text{ W/m}^2$  (人體熱源/桌面面積:  $100 \times 2 / 1 \times 0.9$ )

4. 風扇壓力: 當空氣流體經過風扇面時, 以增壓  $10 \text{ Pa}$  估算, 此時風扇下緣空氣出口流速約為  $2\sim 3 \text{ m/s}$ , 符合實際風速。

### 3-3-3 控制方程式之離散化

對於在求解域內所建立的偏微分方程, 理論上是有精確解的。但是, 由於所處理的問題自身的複雜性, 如複雜的邊界條件, 或者方程自身的複雜性等, 造成很難獲得方程的解析解。因此, 就需要通過數值方法把計算域內有限數量位置(即網格節點)上的因變量值當作基本未知量來處理, 從而建立一組關於這些未知量的代數方程式。

### 3-3-4 數值方法

數值預測紊流模式採用  $k-\varepsilon$  雙方程式紊流模式求解, 在求解器設定上, 壓力速度耦合項使用 SIMPLE 方法, SIMPLE 是英文 (semi-implicit method for pressure-linked equations) 的縮寫, 也可稱作求解壓力耦合方程的半隱式方法, 它是採用猜測-修正的過程並在交錯網格的基礎上來計算壓力場, 進而求解動量方程 (Navier-Stokes equation) 為目的; 對動量方程式、紊流動能方程式、紊流耗散率方程式及能量方程式, 皆採用一階上風法 (First order upwind), 壓力項則是用標準方法 (Standard)。

對壓力、紊流動能、紊流耗散率、溫度及三軸方向的速度進行初始化。設定連續方程式、三軸方向之速度、能量方程式、 $k$ 方程式及  $\varepsilon$  方程式之收斂條件，監控進出口平均溫度後，進行疊代運算。

### 3-3-5 收斂條件

$u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $k$ 、 $\varepsilon$ 、 $P$ 及 $T$ 之值，在每一次的疊代過程中，對每一個控制體積並不一定滿足守恆定律。因此先定義 $\phi$ 的殘差值(residual)為：

$$R^\phi = \frac{\sum_{\text{cell } p} \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p \right|}{\sum_{\text{cells } p} \left| a_p \phi_p \right|} \quad (3-12)$$

在每一次的疊代過程中，可以把收斂條件定成其殘差值小於某一範圍。在本文中定義動量方程式在最後一次疊代的殘差值與第二次疊代的殘差值比小於 $10^{-3}$ 時，始為達到收斂標準；而能量方程式殘差值比小於 $10^{-6}$ 時，始為達到收斂標準。

### 3-3-6 格點測試

由於格點的疏密對於收斂速度和結果有很大的影響，若格點太少，則會影響數值解的準確性；若格點太多，雖可以提高數值解的準確性，但會使得疊代的時間過長，而數值解的誤差也會越來越小，與所增加的時間不成正比。本文格點測試採用四組不同格點數，總網格數分別為 81 萬、92 萬、95 萬與 106 萬。以 case 1 測試，取  $y=1.0\text{m}$  之位置平均溫度分布，分別做了四組總網格數的比較，其溫度分別為 306.617K、307.130K、307.511K、307.742K，相對誤差分別為 1.76%、1.27%、0.75%，故本文採用 95 萬的格點數做為數值計算之基準。

## 3-4 監控點的設定與依據

根據 108 年 12 月 30 日教育部體育司調查統計資料，107 學年度國小學童平均身高調查結果，如表 3-4 所示，男生和女生的平均身高大概是 120~150 公分左右。又根據文獻 [13]，小學學童為坐姿時，呼吸帶高度約為 105 公分，而國小的課桌椅高度約 60~70 公分。因此本研究以 60 公分、100 公分和 150 公分為量測之垂直觀測點，即 Y 軸 0.6、1.0 和 1.5。

表 3-4 國小學童平均身高調查表

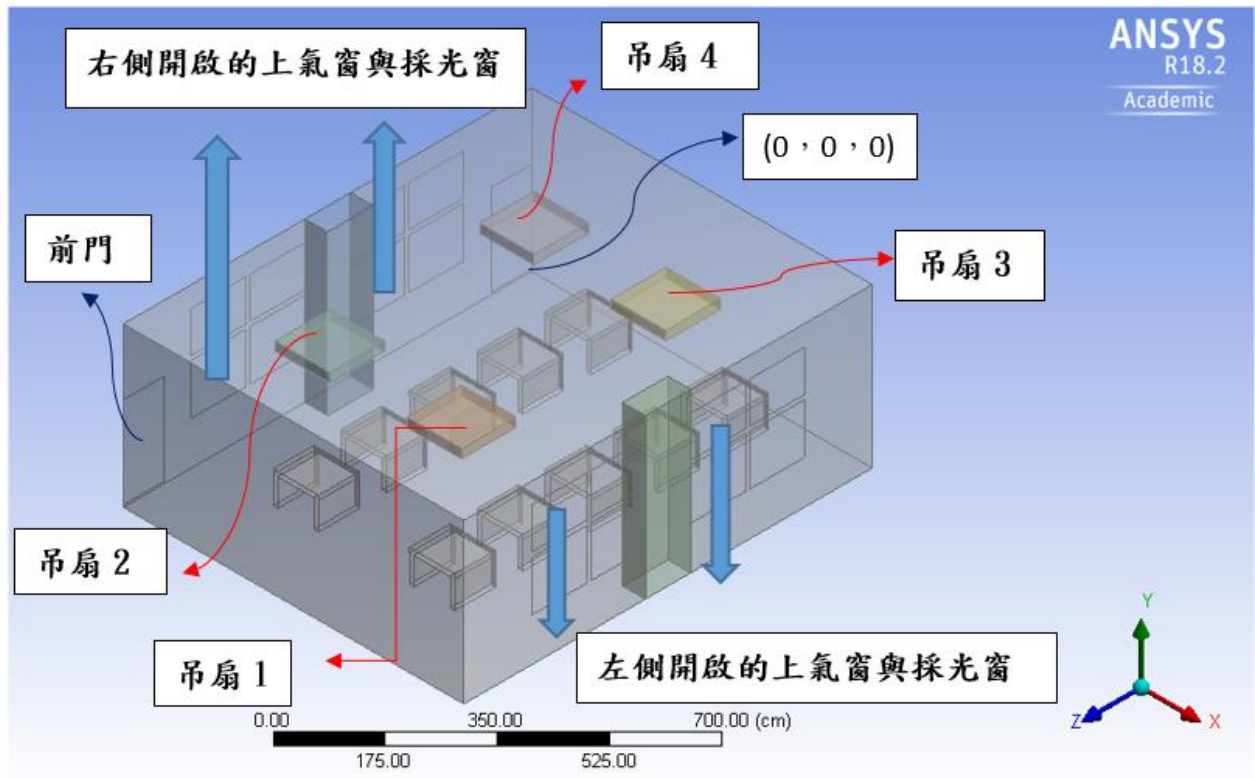
107 學年度 6 歲至 12 歲學生身高平均值 (單位：公分)			
	總計	男	女
6 歲	116.9	117.4	116.3
7 歲	121.2	121.7	120.6
8 歲	127.1	127.6	126.6
9 歲	133.1	133.4	132.9
10 歲	139.0	138.8	139.2
11 歲	145.4	144.7	146.1
12 歲	151.8	151.8	151.9

除了垂直觀測點外，本研究也在面寬 900 公分和淨深 750 公分上截取了其 1/4、1/2 和 3/4 處的點，大約為 X 軸 2.0(吊扇 2、4 區域及靠近出風口區域)、3.75、5.7(吊扇 1、3 區域及靠近入風口區域)，Z 軸 2.2(吊扇 3、4 區域及靠近後門區域)、4.5、6.7(吊扇 1、2 區域及靠近前門區域)。

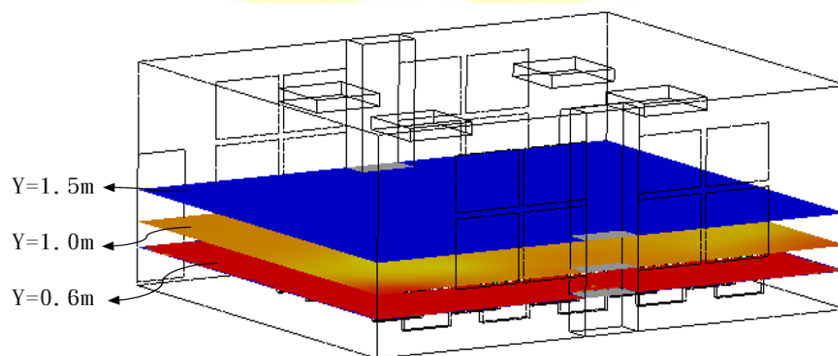


## 第四章 結果與討論

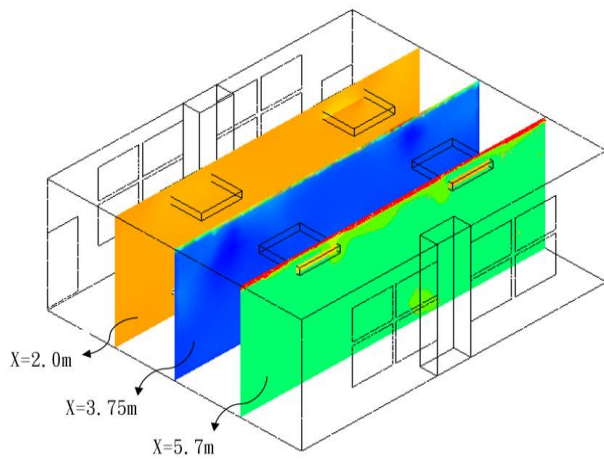
本章節錄本研究探討案例之解析結果，並將 CFD 數值解析結果轉換為本研究擬定之評估方式，利用氣流場、溫度場分布狀態進行分析。圖 4-1 教室空間模擬圖(a)教室空間示意圖(b)教室內部 X 平面示意圖(c)教室內部 Y 平面示意圖(d)教室內部 Z 平面示意圖，表 4-1 列示各模組代號及說明，各模式之溫度場及氣流場現象，如圖 4-2~4-11 所示。



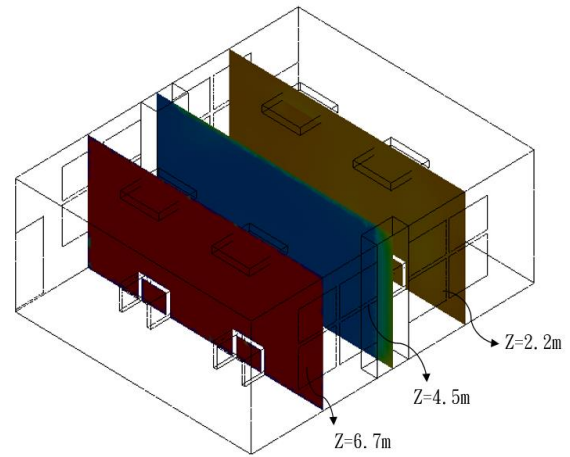
(a) 教室空間示意圖



(b) 教室內部 Y 平面示意圖



(c)教室內部 X 平面示意圖



(d)教室內部 Z 平面示意圖

圖 4-1 教室空間模擬圖(a)教室空間示意圖(b)教室內部 Y 平面示意圖(c)教室內部 X 平面示意圖(d)教室內部 Z 平面示意圖

表 4-1 本研究數值模擬各模組代號說明

	開口部		吊扇開啟狀態				
	上氣窗	採光窗	無	1、2	2、4	1、4	全部
Case1	✓	✓	✓				
Case2	✓	✓		✓			
Case3	✓	✓			✓		
Case4	✓	✓				✓	
Case5	✓	✓					✓
Case6		✓	✓				
Case7		✓		✓			
Case8		✓			✓		
Case9		✓				✓	
Case10		✓					✓

## 4-1 自然通風與搭配吊扇使用的室內流場與溫度場的分布狀況

### 4-1-1 「case 1 和 case 6 速度場分布現象之比較」

從圖 4-2(a)教室速度場流線圖可以發現，case 1 和 case 6 兩模組在自然通風下，都因為風力不足形成教室內的流場速度有偏低的狀況，在氣流末端接近地板時會形成明顯的迴流現象；在氣流末端接近桌面時，氣流會往左右方向分離而形成了渦流現象。而且在圖 4-2(b)不同 Y 截面位置之速度分布上發現，case 1 的流場速度似乎也比 case 6 快一些，但整個流場的流速幾乎都低於 0.3m/s，所以還是呈現無感氣流狀態。

#### 4-1-2 「case 2 和 case 7 速度場分布現象之比較」

從圖 4-3(a)教室速度場流線圖可以發現，case 2 和 case 7 因為開啟了教室前面的兩座吊扇 1、2，使得教室前半部流場速度明顯變快。而在圖 4-3(b)Y 截面發現，當高度愈高，位於吊扇下方區域的氣流流動速度則會愈快，Y=1.5m 處吊扇下方速度已經達到 2.5m/s。在圖 4-3(c)X 截面發現，吊扇下方區域越往下的速度會漸漸減緩，氣流接近地面形成迴流，都造成更多的擾動現象。在圖 4-3(d)Z 截面發現，愈往教室前面方向移動，流場速度愈趨明顯，這是因為開啟吊扇 1、2 所造成下方區域有明顯的擾動現象。

#### 4-1-3 「case 3 和 case 8 速度場分布現象之比較」

從圖 4-4(a)教室速度場流線圖可以發現，開啟窗邊的兩座吊扇 2、4 讓教室內的右側區域流場速度變快，且擾動的情況比左側區域明顯。在圖 4-4(b)Y 截面發現，高度愈高則吊扇 2、4 下方區域的速度愈明顯，case 8 比 case 3 流動速度還快；而在圖 4-4(c)X 截面發現，兩模組在靠近出風口以及吊扇下方的區域速度最快，愈往入風口也因為遠離吊扇 2、4，所以速度明顯趨緩許多；在圖 4-4(d)Z 截面發現，位於吊扇 2、4 的區域也就是教室的右側區域速度明顯比左側區域快了許多。

#### 4-1-4 「case 4 和 case 9 速度場分布現象之比較」

從圖 4-5(a)教室速度場流線圖可以發現，兩模組都因為開對角風扇 1、4 讓整間教室的氣流場擾動更為複雜。在圖 4-5(b)Y 截面發現，1.0m 高度上的流場速度似乎比在 1.5m 高度上還要集中於對角吊扇之間的區域；在圖 4-5(c)X 截面發現，位於教室中間區域即 X=3.75m，因為對角風扇開啟，導致其擾動加劇，因此影響其中間區域較為明顯，也因此於接近地面處產生另一股較強的氣流；在圖 4-5(d)Z 截面發現，位於教室中間區域因為左右兩邊不是窗戶而是兩根柱子，原本造成通風不良的狀況也因開啟對角風扇增加空氣對流，讓其中間區域因此呈現比 case 3 等較快的速度場。



#### 4-1-5 「case 5 和 case 10 速度場分布現象之比較」

從圖 4-6(a)教室速度場流線圖可以發現，將四座吊扇全部開啟讓整間教室的氣流場速度加快，其中 case 5 流場擾動比 case 10 明顯。在圖 4-6(b)Y 截面發現，垂直高度愈高、流場速度愈快，是由於自然對流效應的影響，而 case 5 一樣比 case 10 明顯；在圖 4-6(c)X 截面發現，因為吊扇全部開啟增加整間教室的空氣對流，因此在入風處與出風處的吊扇區域流場速度都明顯比其他 case 還要快；在圖 4-6(d)Z 截面發現，除了教室的吊扇區域流場速度較快之外，位於柱子中間  $Z=4.5\text{m}$  的截面上，因為空氣對流較旺盛，導致其接近桌面與地面的區域有一股較強的渦流產生。

#### 4-1-6 「case 1 和 case 6 溫度場分布現象之比較」

從圖 4-7(a)Y 截面可以發現，兩模組的溫度場只有靠近出風口區域的溫度較低外，其餘各區域溫度分佈都很平均，而且  $Y=1.0\text{m}$  截面上顯示其蓄積熱現象相當明顯，這是因為此處位置於發熱面的稍為上方處的關係。

#### 4-1-7 「case 2 和 case 7 溫度場分布現象之比較」

從圖 4-7(a)Y 截面發現，兩模組在吊扇 1、2 的下方區域有較低的溫度，且教室的前半部區域溫度分布較為平均，而在出風口右後窗到後門的區域則顯示為溫度最低的地方，是由於開啟吊扇增加空氣自然對流效應的影響。而在  $Y=1.0\text{m}$  截面的中間區域依然有蓄積熱的現象，但比 case 1 有減少趨勢。

#### 4-1-8 「case 3 和 case 8 溫度場分布現象之比較」

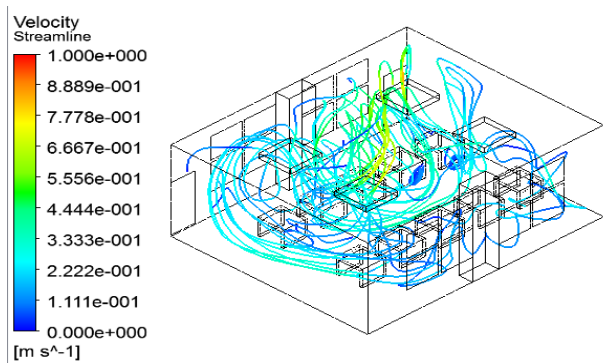
從圖 4-9(a)Y 截面可以發現，兩模組在  $Y=1.0\text{m}$  還是有些許的蓄熱現象，而在  $Y=1.5\text{m}$  截面上蓄熱現象則有減緩趨勢，是因為離發熱面的高度較遠的關係；在圖 4-9(b)X 截面發現，天花板蓄積熱的現象從入風處往出風處方向有減緩的跡象，是因為吊扇下方區域增加空氣流通；在圖 4-9(c)Z 截面發現，由於開啟的吊扇位於近出風處區域，因此從入風處的溫度會呈現較高的溫度狀態，也就是教室的左側區域溫度會高於右側區域。

#### 4-1-9 「case 4 和 case 9 溫度場分布現象之比較」

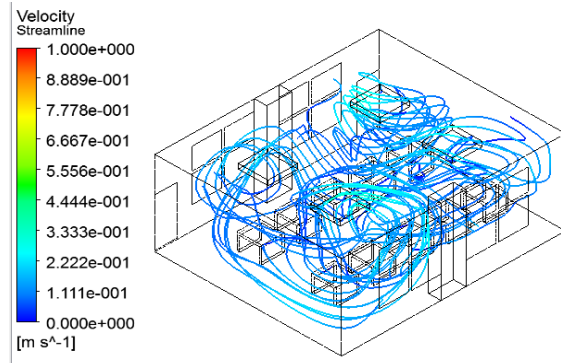
從圖 4-10(a)Y 截面可以發現，兩模組的溫度場分佈平均；在圖(b)X 截面發現， $X=2.0\text{m}$  靠近出風口的區域中桌面因為有假設熱源，且高度在 60 公尺處，氣流無法有效將熱帶走，因此會發現桌面上有較高的溫度產生，尤其在遠離吊扇 1、4 的前半區域特別明顯；在圖(c)Z 截面上發現，因為開啟對角吊扇使得其中間的區域產生較多的空氣流通，使中間區域風量較為穩定，因此  $Z=4.5\text{m}$  處的溫度分布較為平均。而在  $Z=6.7\text{m}$  截面上吊扇在其區域上產生對流效益，因此在其領域下有一處低溫現象。

#### 4-1-10 「case 5 和 case 10 溫度場分布現象之比較」

從圖 4-11(a) Y 截面上發現，兩模組因為四座吊扇全部都開啟，溫度的分佈除了在  $Y=1.0\text{m}$  截面上有零星的蓄積熱外，教室內的溫度分佈都很平均；在圖 4-11(b)X 截面也發現，吊扇下方的領域，都呈現較低的溫度。在圖 4-11(c)Z 截面發現，在教室中間區域溫度分布平均，而教室左右兩側的入風處與出風處因為對流效益的影響，呈現較低溫的狀態。

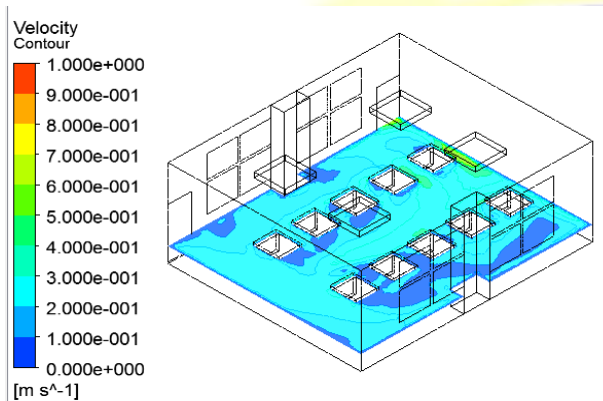


case 1

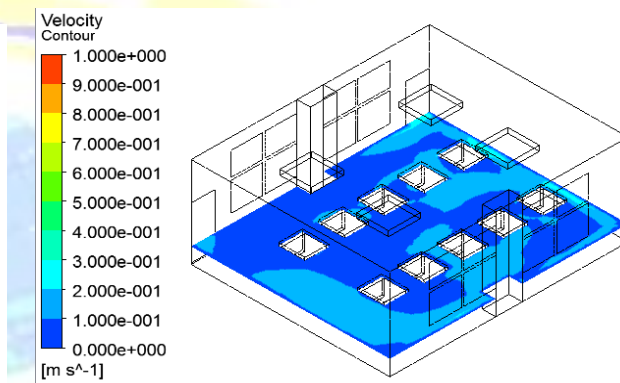


case 6

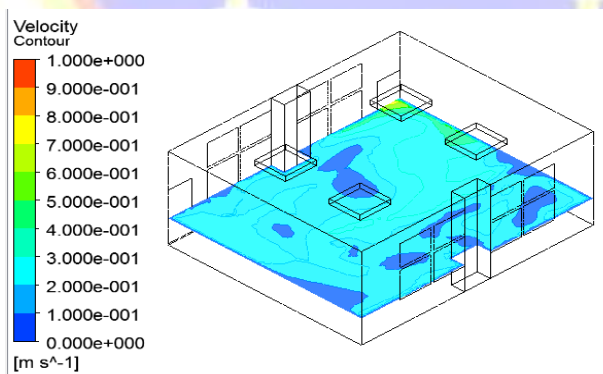
(a)教室速度場流線圖



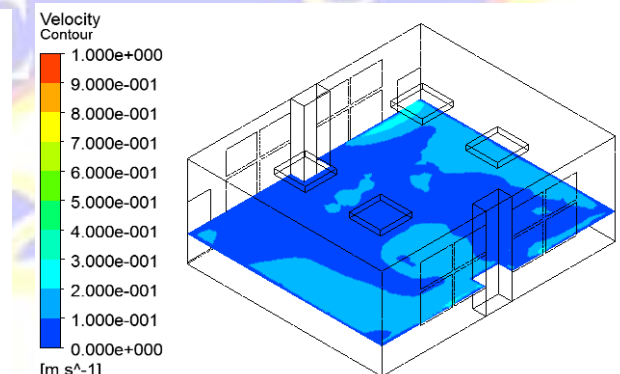
(case 1)Y=0.6m 截面圖



(case 6)Y=0.6m 截面圖

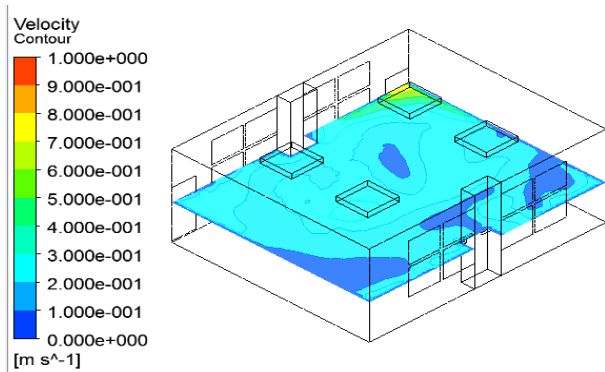


(case 1)Y=1.0m 截面圖

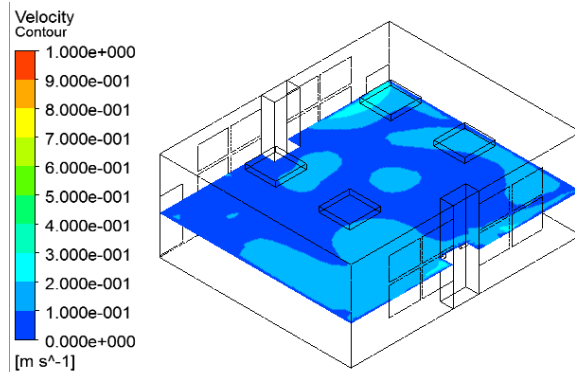


(case 6)Y=1.0m 截面圖





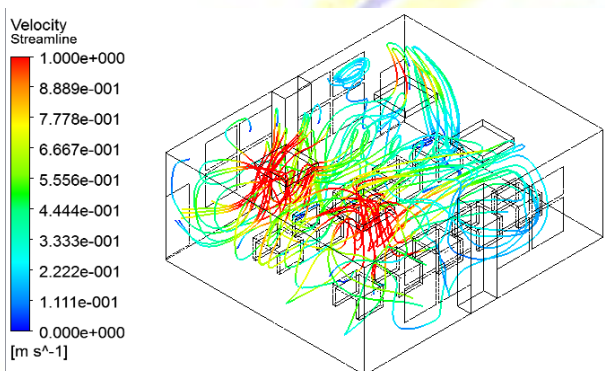
(case 1)Y=1.5m 截面圖



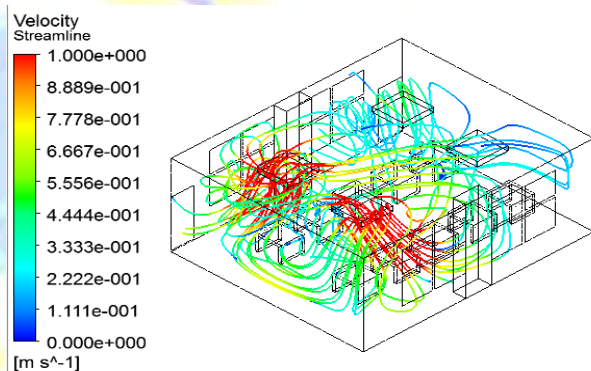
(case 6)Y=1.5m 截面圖

(b)不同 Y 截面位置之速度分布圖

圖 4-2 case1、case6 的速度場分布圖(a)教室速度場流線圖(b)不同 Y 截面位置之速度分布圖

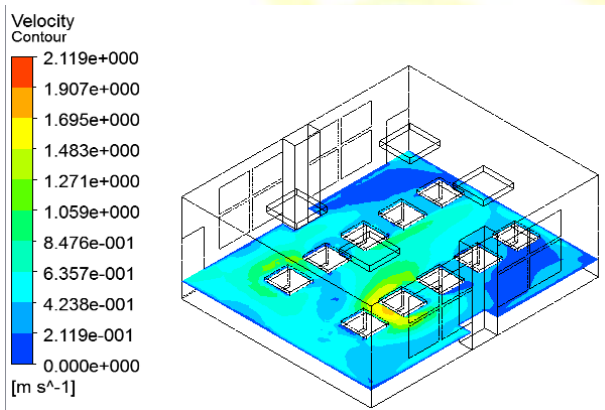


case 2

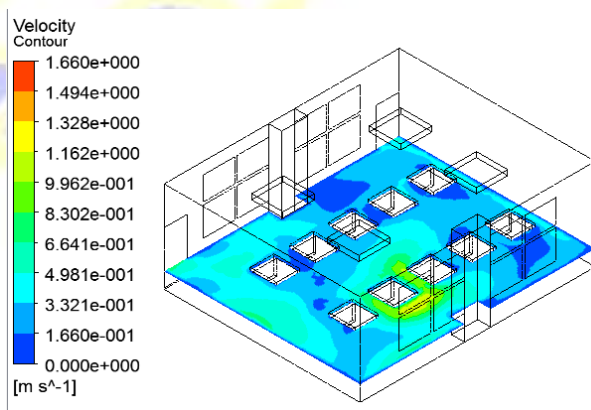


case 7

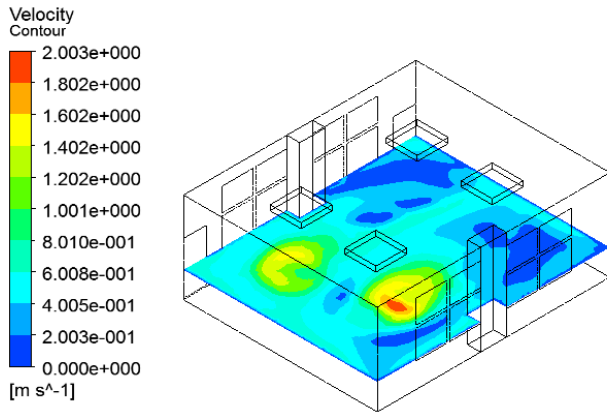
(a)教室速度場流線圖



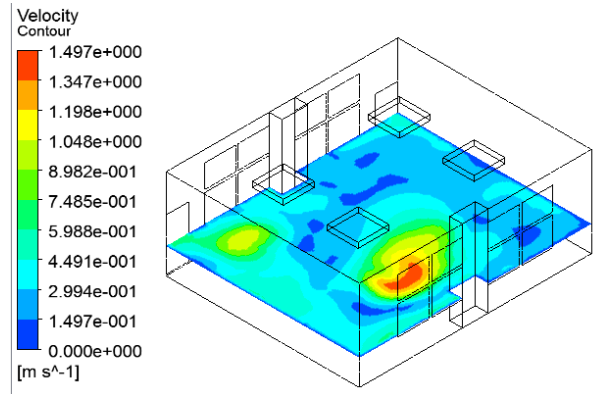
(case 2)Y=0.6m 截面圖



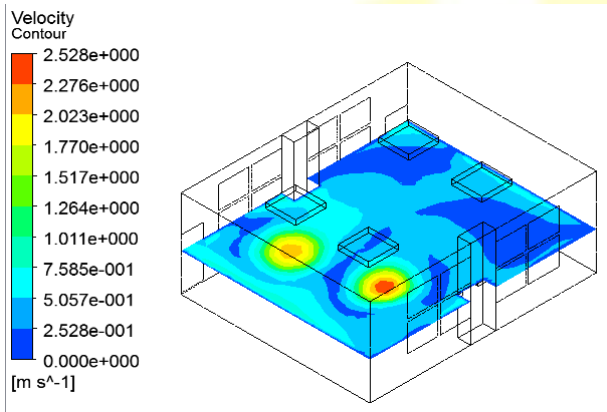
(case 7)Y=0.6m 截面圖



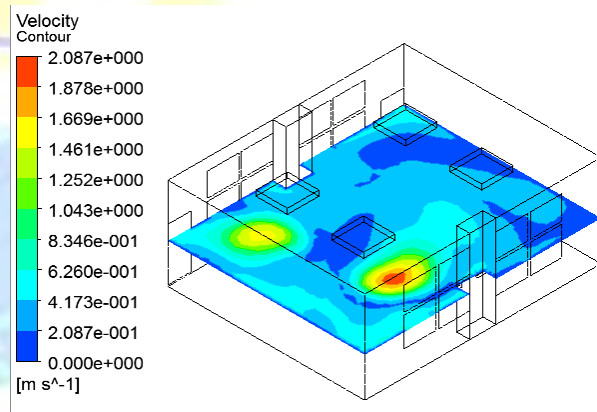
(case 2)Y=1.0m 截面圖



(case 7)Y=1.0m 截面圖

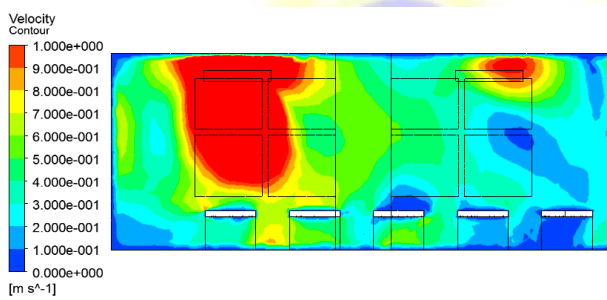


(case 2)Y=1.5m 截面圖

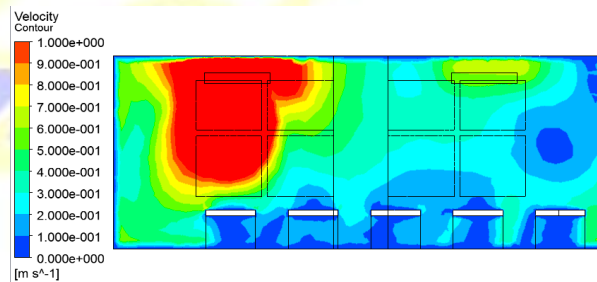


(case 7)Y=1.5m 截面圖

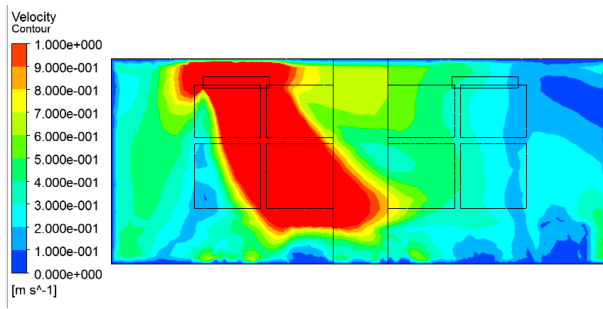
(b)不同 Y 截面位置之速度分布圖



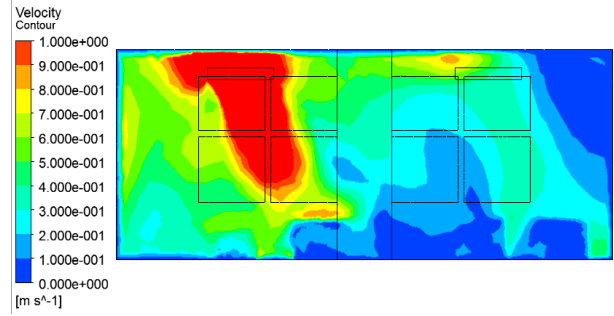
(case 2)X=2.0m 截面圖



(case 7)X=2.0m 截面圖

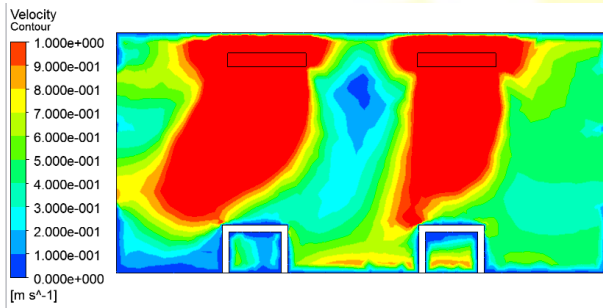


(case 2)X=5.7m 截面圖

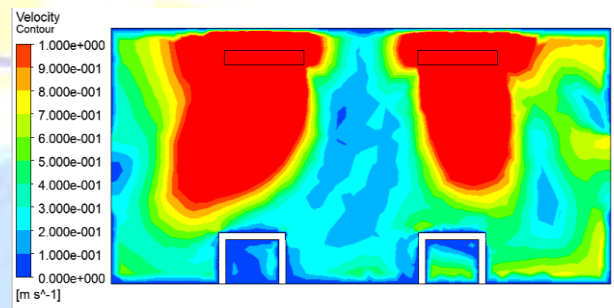


(case 7)X=5.7m 截面圖

(C) 不同 X 截面位置之速度分布圖



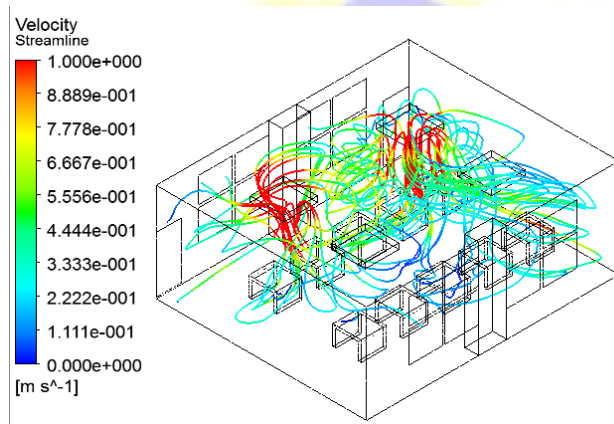
(case 2)Z=6.7m 截面圖



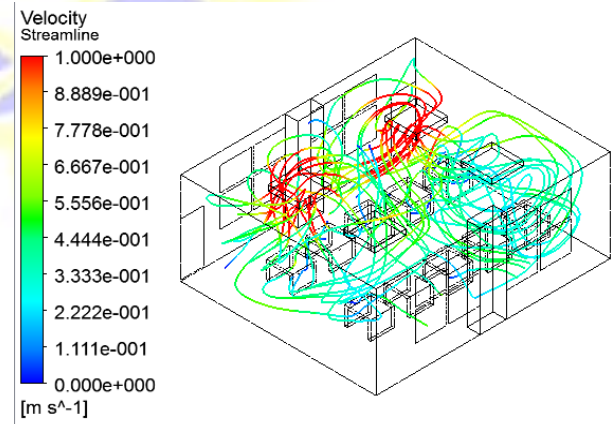
(case 7)Z=6.7m 截面圖

(d) Z 截面位置之速度分布圖

圖 4-3 case 2、case 7 速度場分布圖(a)教室速度場流線圖(b)不同 Y 截面位置之速度分布圖(C) 不同 X 截面位置之速度分布圖(d) Z 截面位置之速度分布圖

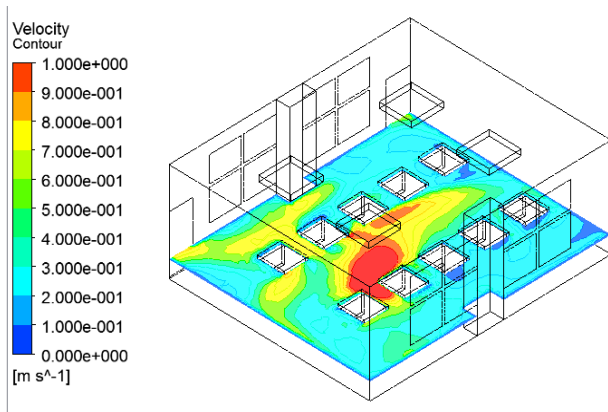


case 3

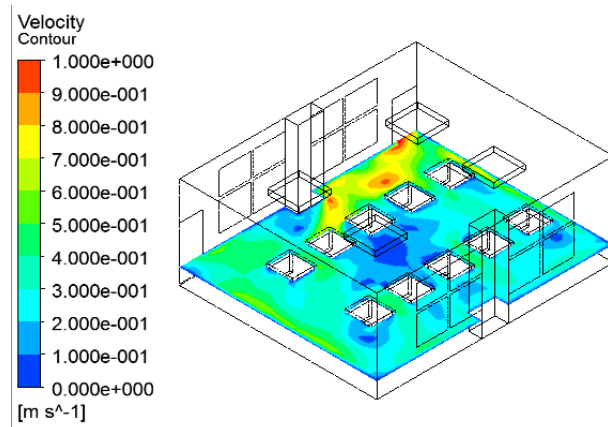


case 8

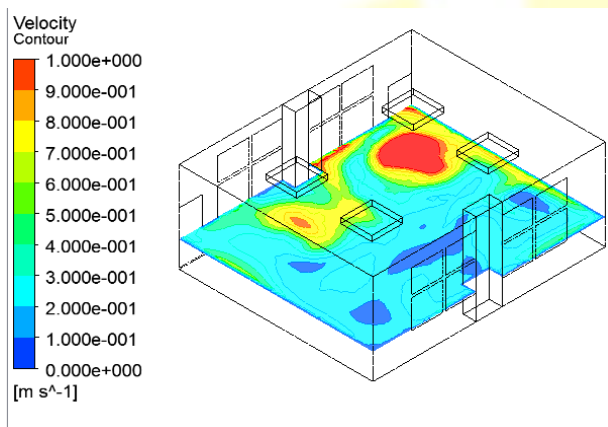
(a)教室速度場流線圖



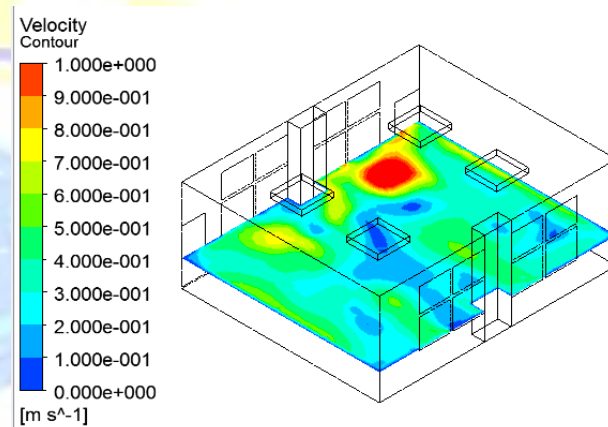
(case 3)Y=0.6m 截面圖



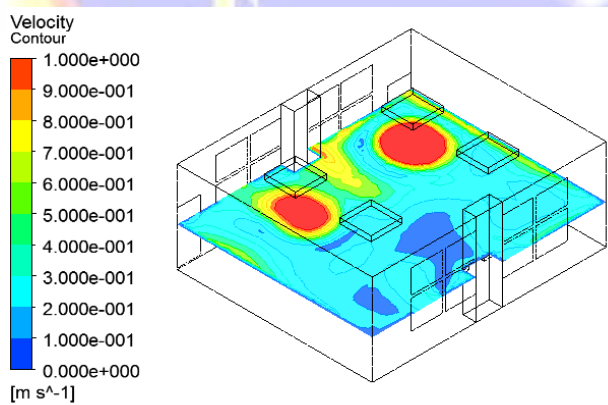
(case 8)Y=0.6m 截面圖



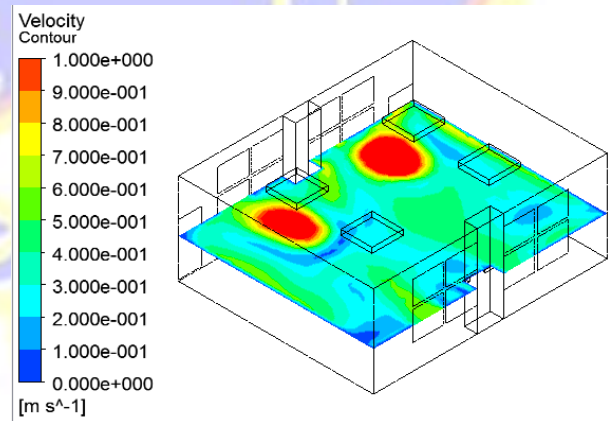
(case 3)Y=1.0m 截面圖



(case 8)Y=1.0m 截面圖



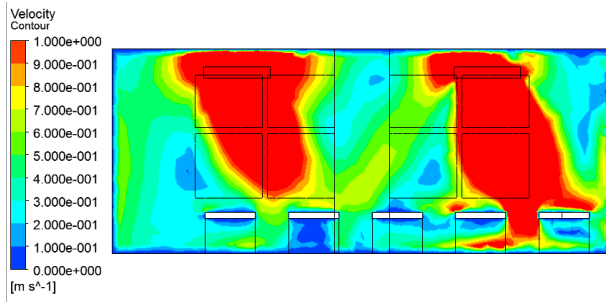
(case 3)Y=1.5m 截面圖



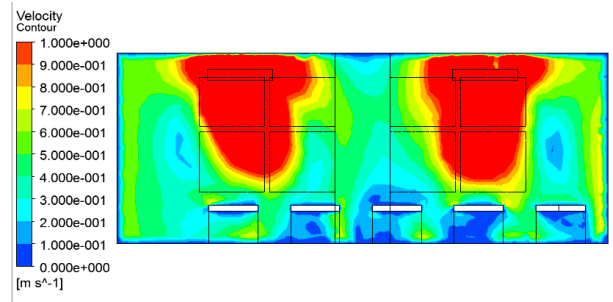
(case 8)Y=1.5m 截面圖

(b) 不同 Y 截面位置之速度分布圖

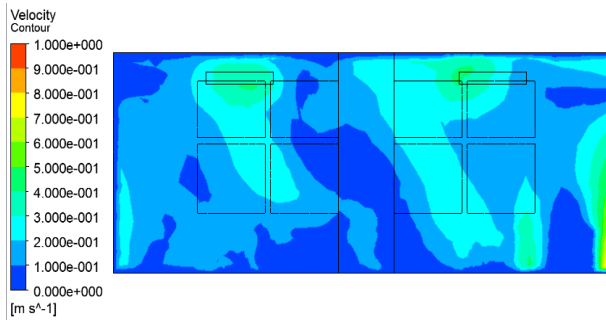




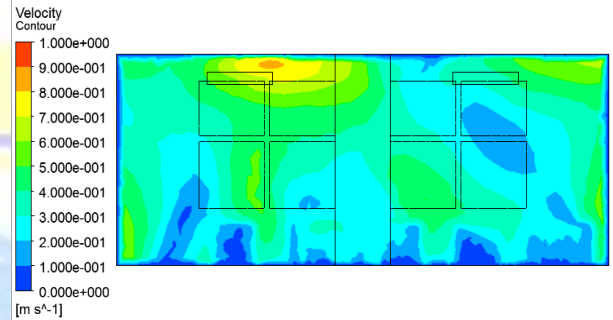
(case 3)X=2.0m 截面圖



(case 8)X=2.0m 截面圖

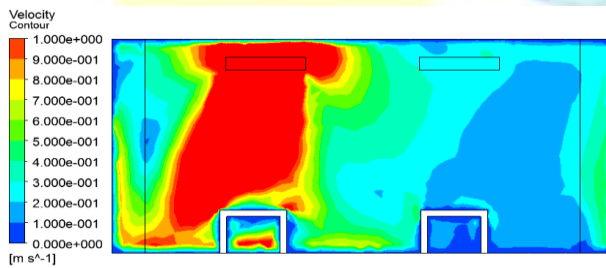


(case 3)X=5.7m 截面圖

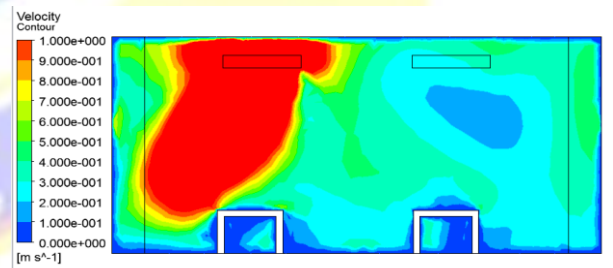


(case 8)X=5.7m 截面圖

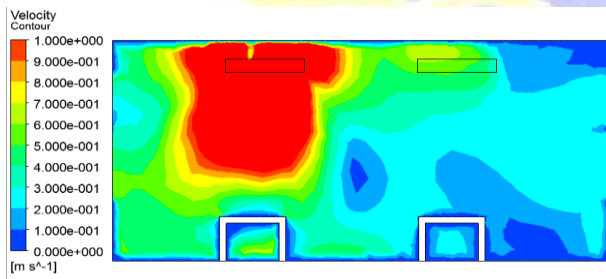
(c) 不同 X 截面位置之速度分布圖



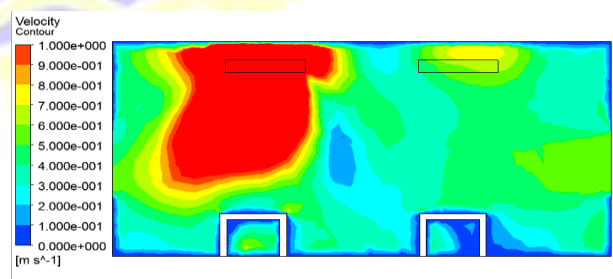
(case 3)Z=2.2m 截面圖



(case 8)Z=2.2m 截面圖



(case 3)Z=6.7m 截面圖

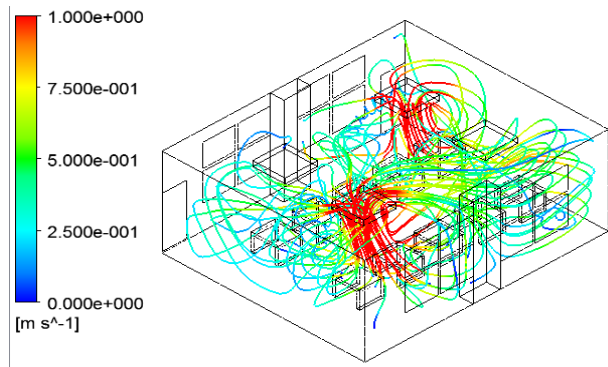


(case 8)Z=6.7m 截面圖

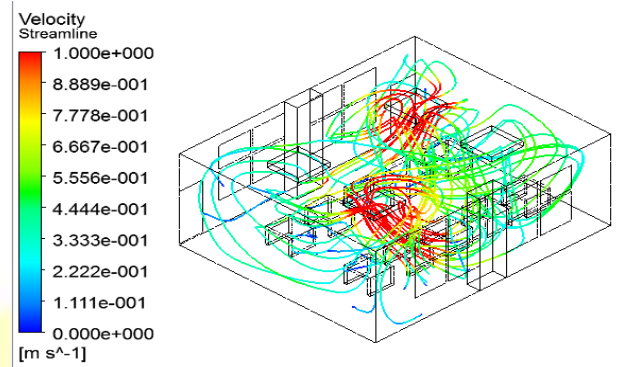
(d) 不同 Z 截面位置之速度分布圖

圖 4-4 case 3、case 8 速度場分布圖(a)教室速度場流線圖(b)不同 Y 截面位置之速度分布圖(c)不同 X 截面位置之速度分布圖(d)不同 Z 截面位置之速度分布圖



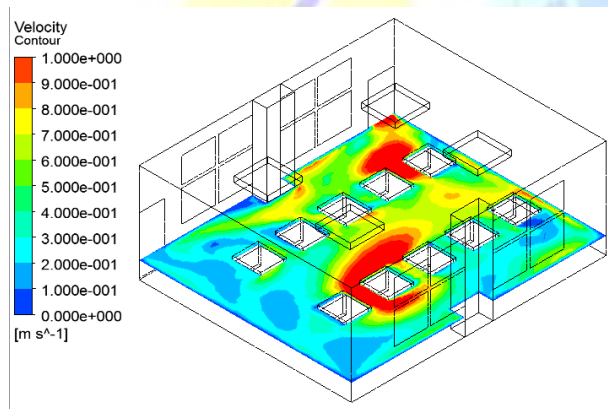


case 4

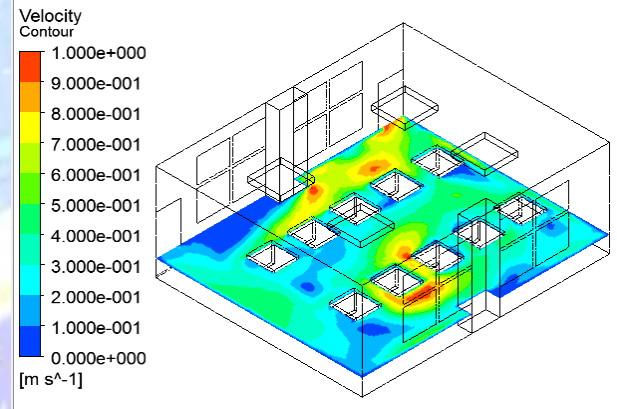


case 9

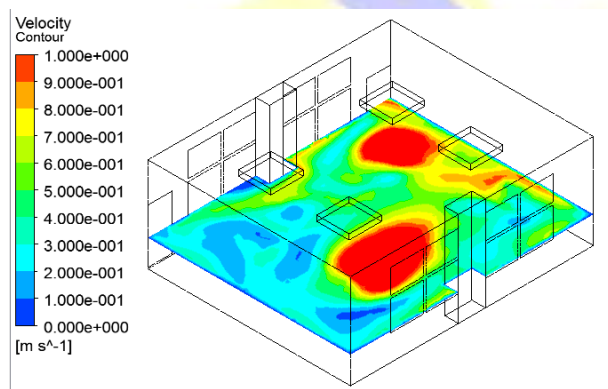
(a) 教室速度場流線圖



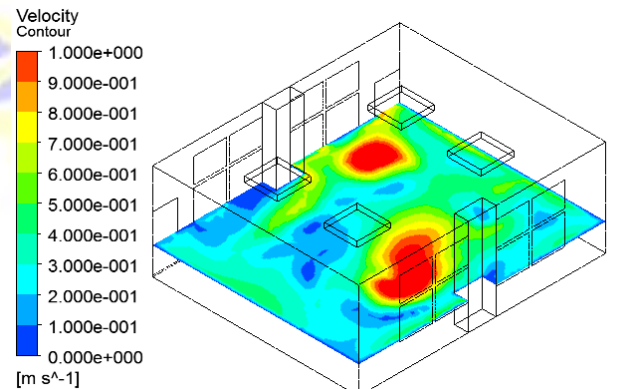
(case 4)Y=0.6m 截面圖



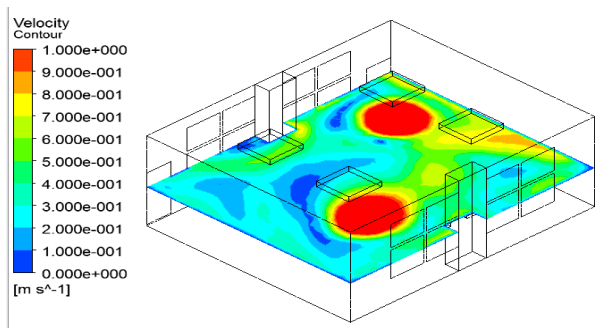
(case 9)Y=0.6m 截面圖



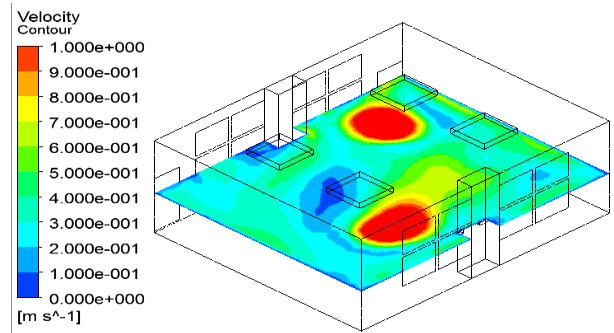
(case 4)Y=1.0m 截面圖



(case 9)Y=1.0m 截面圖

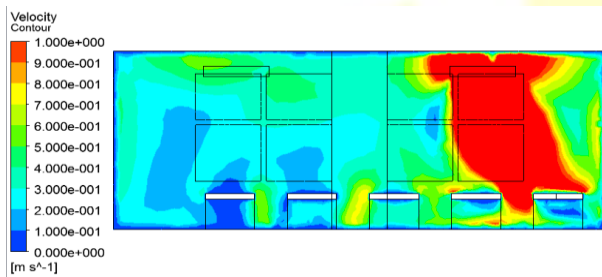


(case 4)Y=1.5m 截面圖

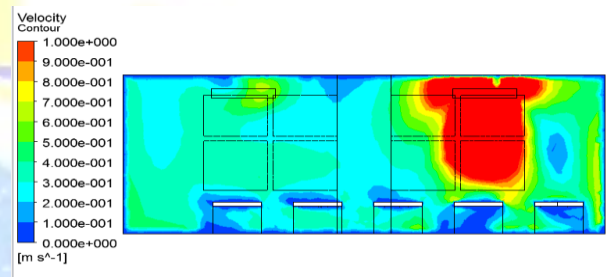


(case 9)Y=1.5m 截面圖

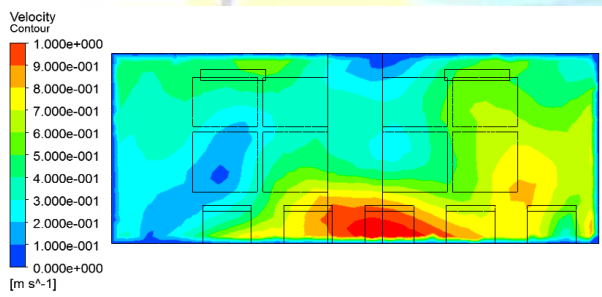
(b) 不同 Y 截面位置之速度分布



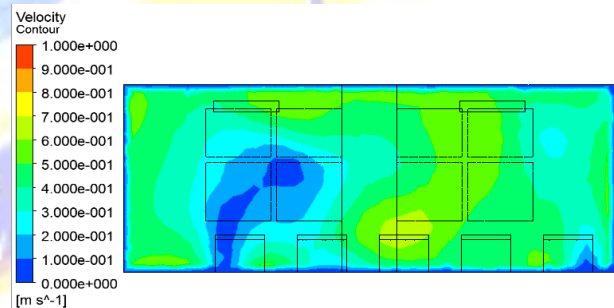
(case 4)X=2.0m 截面圖



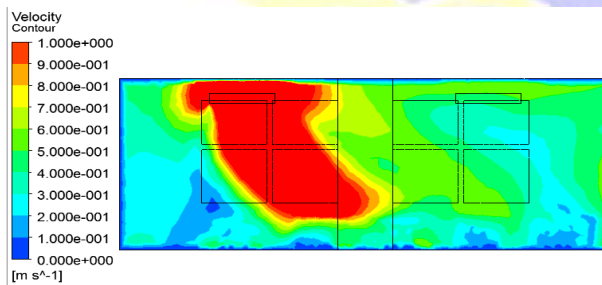
(case 9)X=2.0m 截面圖



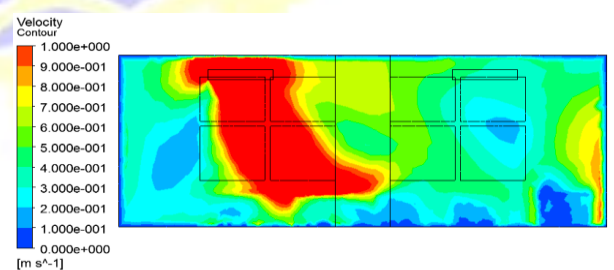
(case 4)X=3.75m 截面圖



(case 9)X=3.75m 截面圖

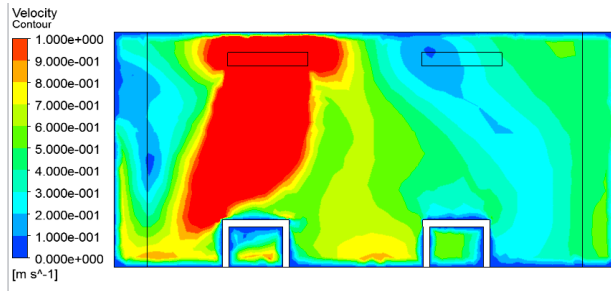


(case 4)X=5.7m 截面圖

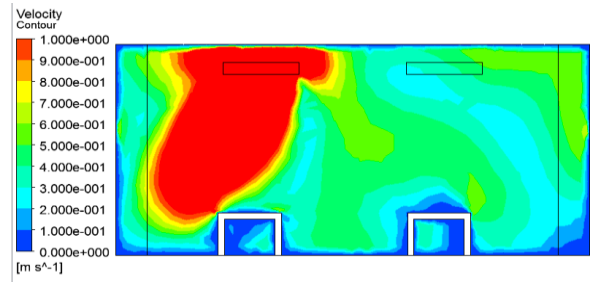


(case 9)X=5.7m 截面圖

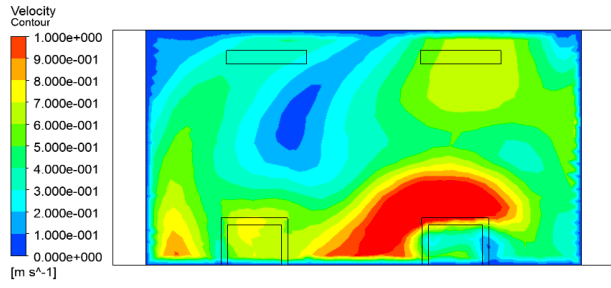
(c) 不同 X 截面位置之速度分布



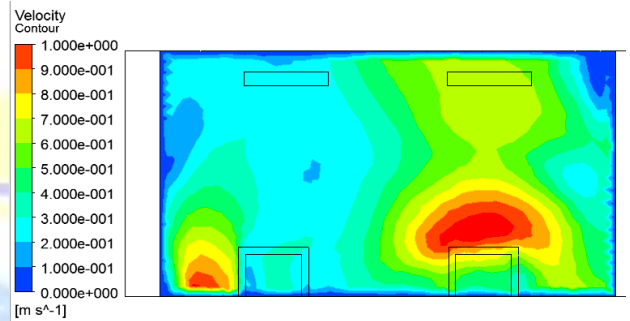
(case 4)Z=2.2m 截面圖



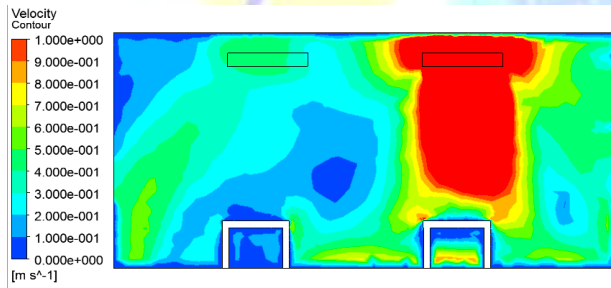
(case 9)Z=2.2m 截面圖



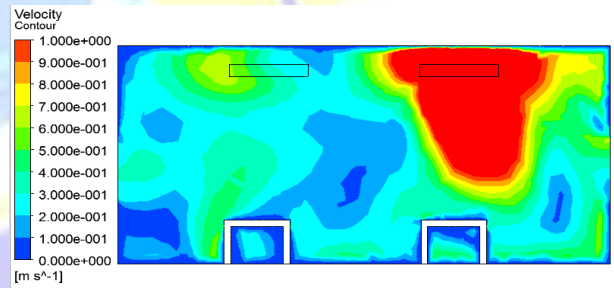
(case 4)Z=4.5m 截面圖



(case 9)Z=4.5m 截面圖



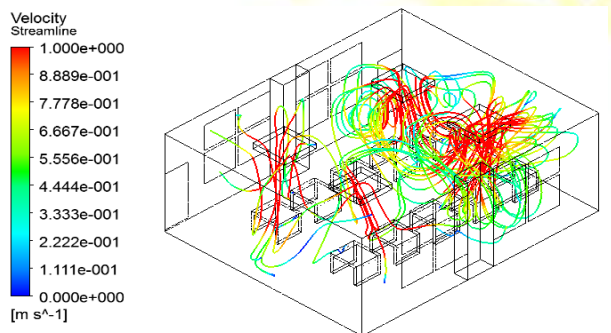
(case 4)Z=6.7m 截面圖



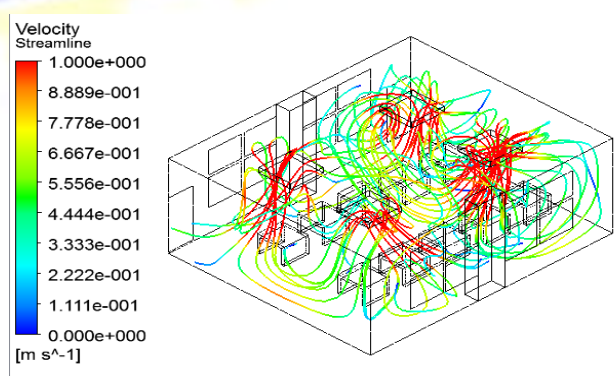
(case 9)Z=6.7m 截面圖

(d) 不同 Z 截面位置之速度分布

圖 4-5 case 4、case 9 速度場分布圖(a)教室速度場流線圖(b)不同 Y 截面位置之速度分布圖(c)不同 X 截面位置之速度分布圖(d)不同 Z 截面位置之速度分布圖

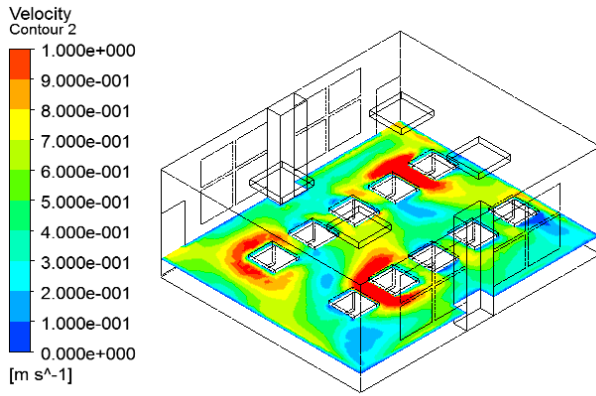


case 5

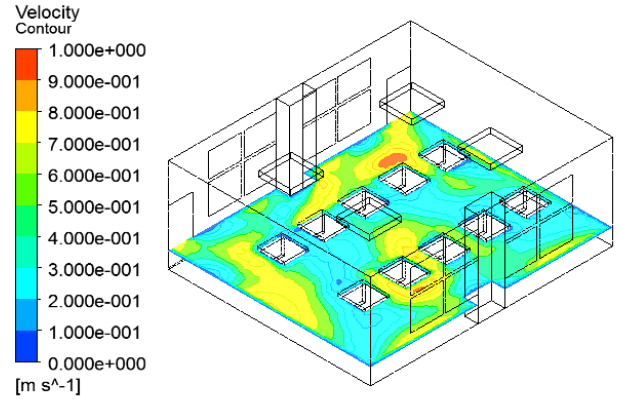


case 10

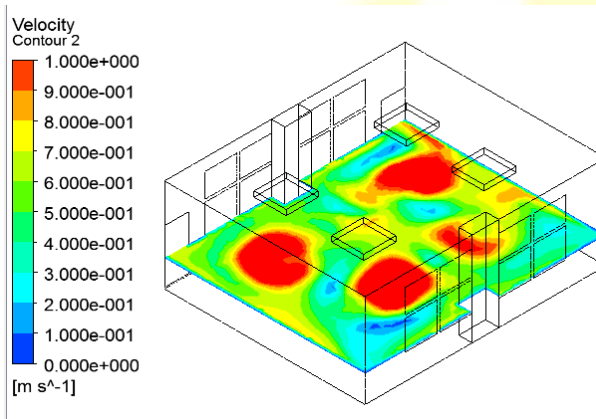
(a)教室速度場流線圖



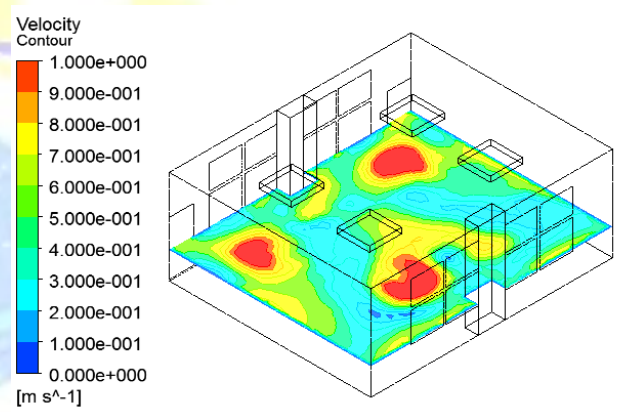
(case 5)Y=0.6m 截面圖



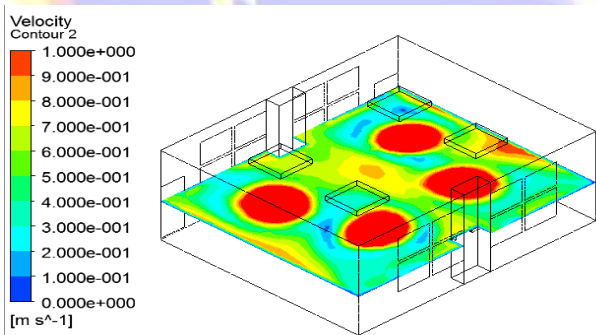
(case 10)Y=0.6m 截面圖



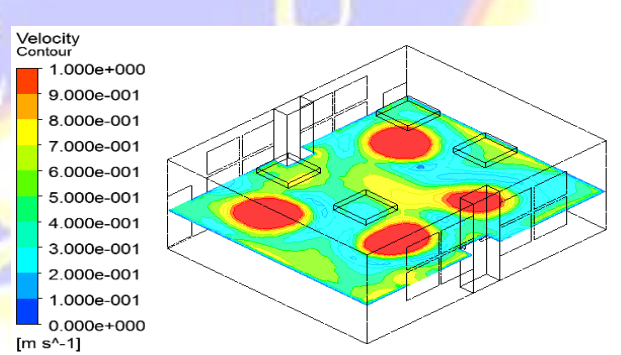
(case 5)Y=1.0m 截面圖



(case 10)Y=1.0m 截面圖



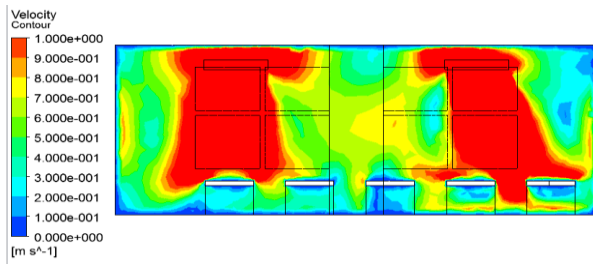
(case 5)Y=1.5m 截面圖



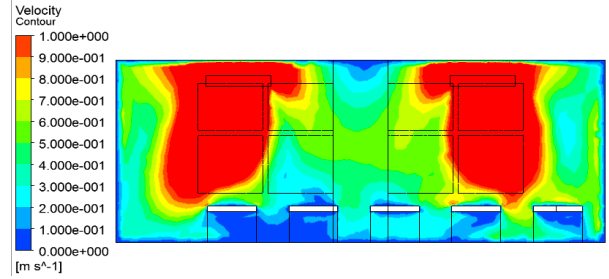
(case 10)Y=1.5m 截面圖

(b) 不同 Y 截面位置之速度分布圖

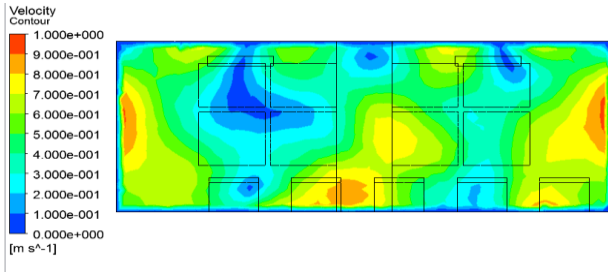




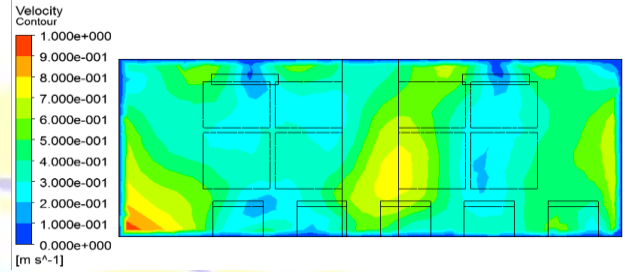
(case 5)X=2.0m 截面圖



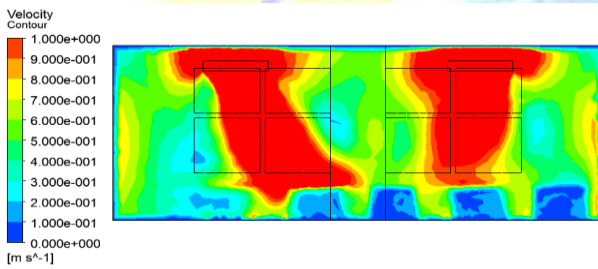
(case 10)X=2.0m 截面圖



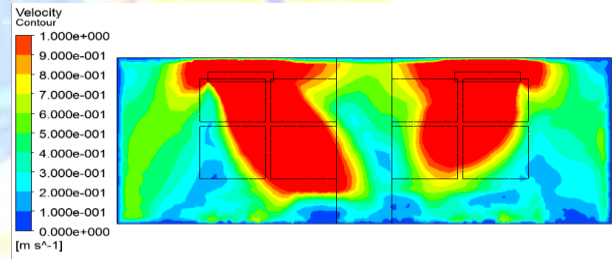
(case 5)X=3.75m 截面圖



(case 10)X=3.75m 截面圖



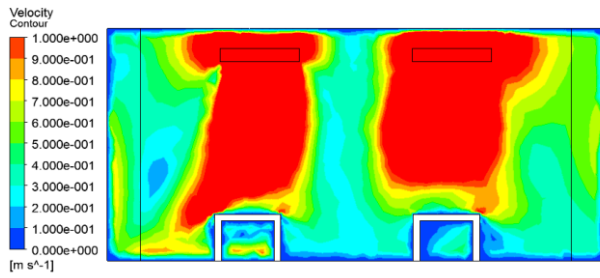
(case 5)X=5.7m 截面圖



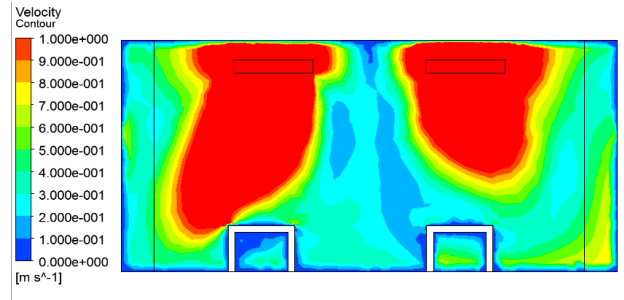
(case 10)X=5.7m 截面圖

(c) 不同 X 截面位置之速度分布圖

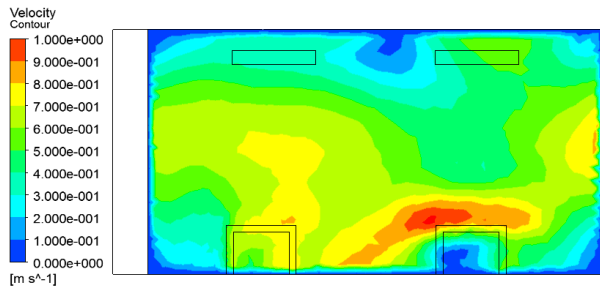




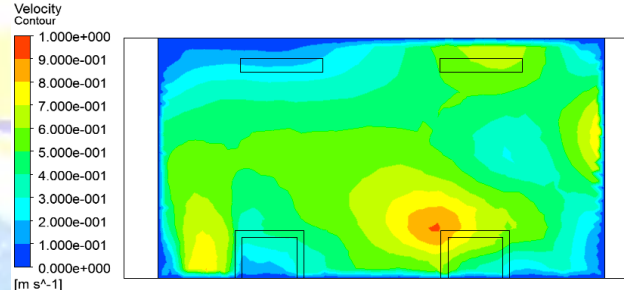
(case 5)Z=2.2m 截面圖



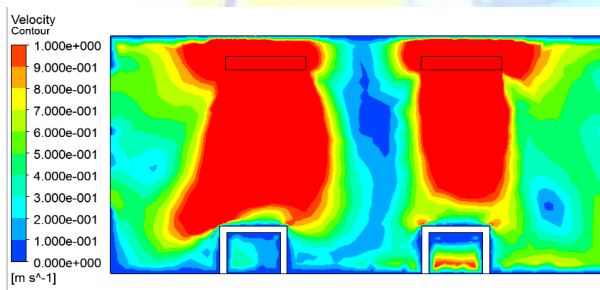
(case 10)Z=2.2m 截面圖



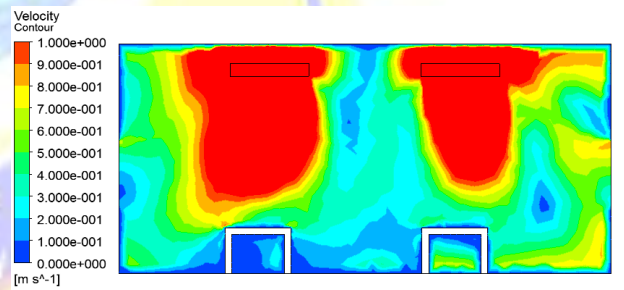
(case 5)Z=4.5m 截面圖



(case 10)Z=4.5m 截面圖



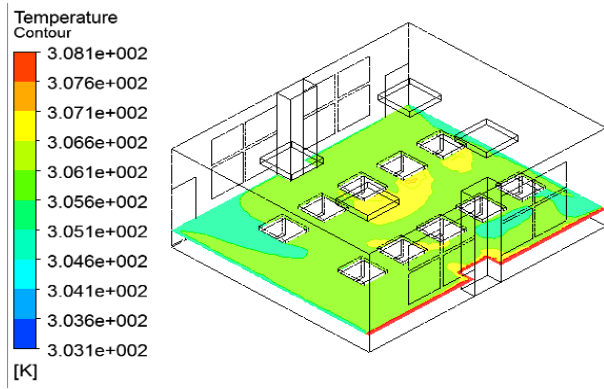
(case 5)Z=6.7m 截面圖



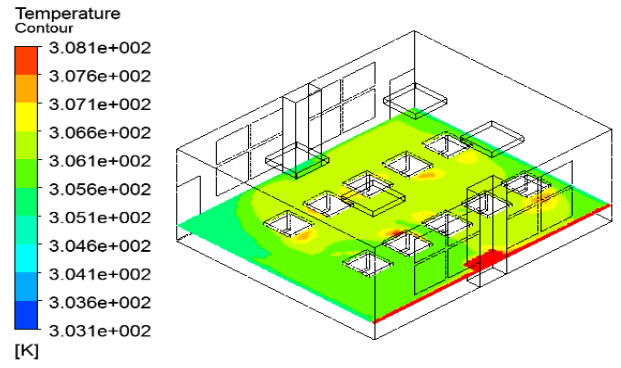
(case 10)Z=6.7m 截面圖

(d) 不同 Z 截面位置之速度分布圖

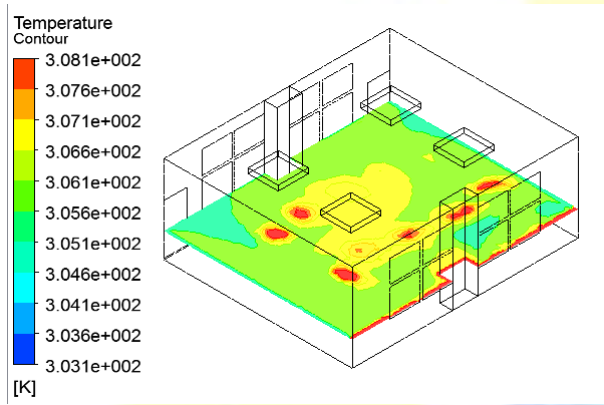
圖 4-6 case 5、case 10 速度場分布圖(a)教室速度場流線圖(b)不同 Y 截面位置之速度分布圖(c)不同 X 截面位置之速度分布圖(d)不同 Z 截面位置之速度分布圖



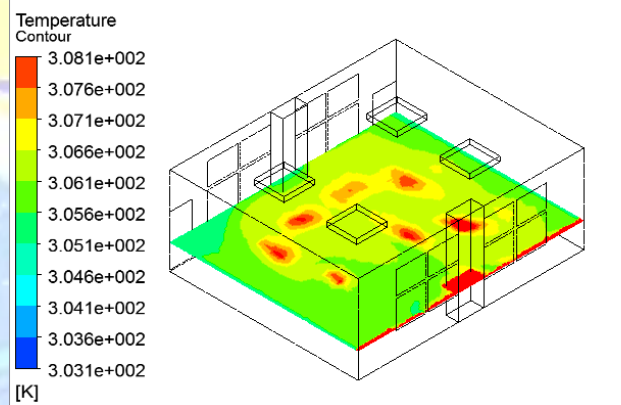
(case 1)Y=0.6m 截面圖



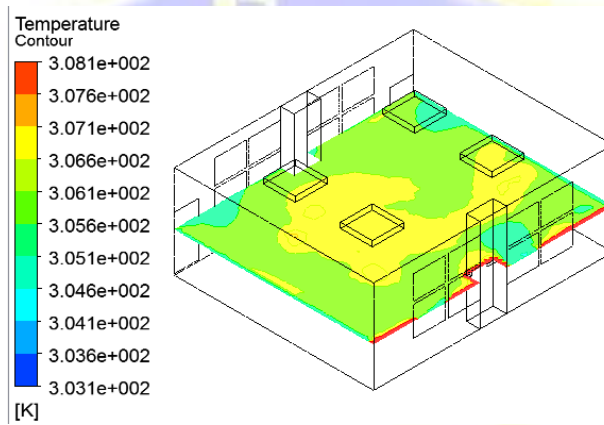
(case 6)Y=0.6m 截面圖



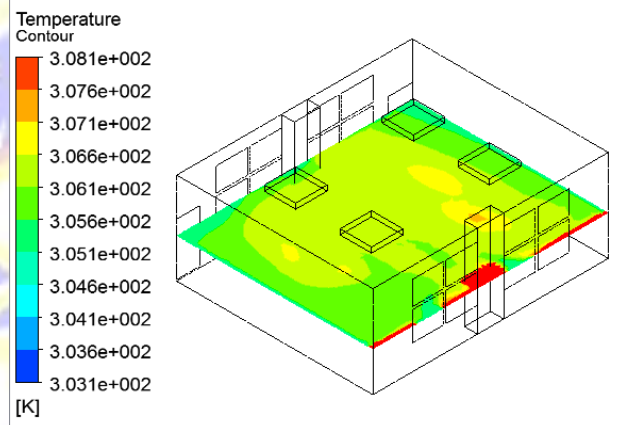
(case 1)Y=1.0m 截面圖



(case 6)Y=1.0m 截面圖

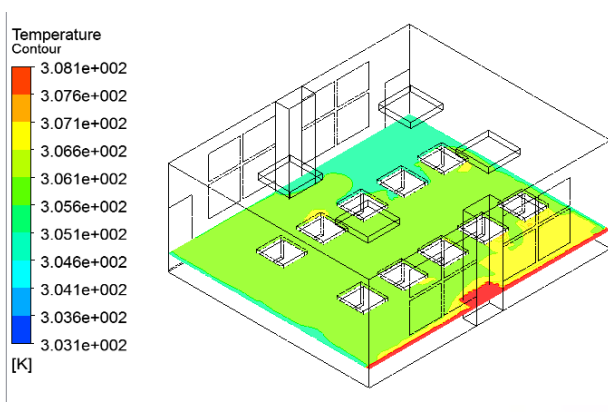


(case 1)Y=1.5m 截面圖

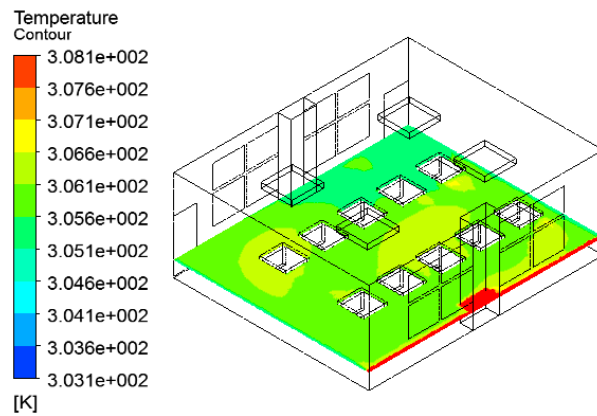


(case 6)Y=1.5m 截面圖

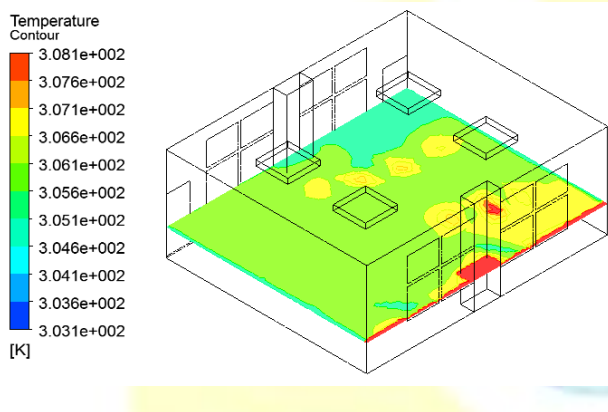
圖 4-7 case 1、case 6 的不同 Y 截面位置之溫度場分布圖



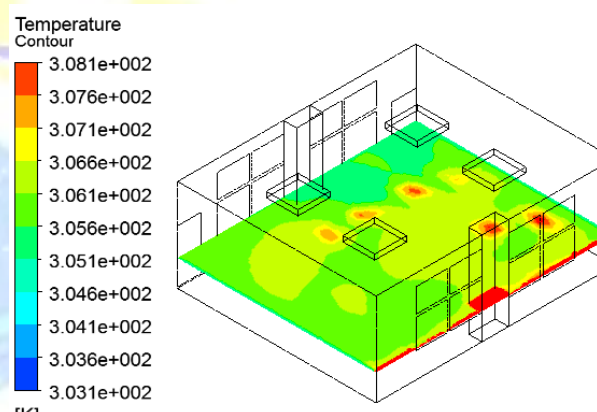
(case 2)Y=0.6m 截面圖



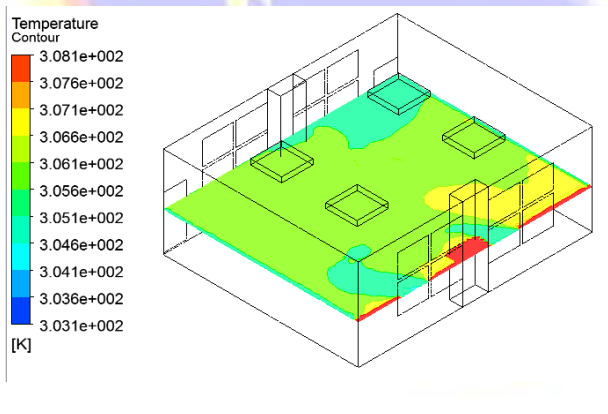
(case 7)Y=0.6m 截面圖



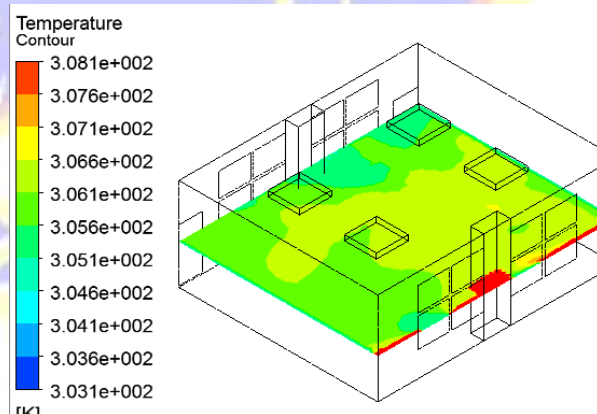
(case 2)Y=1.0m 截面圖



(case 7)Y=1.0m 截面圖

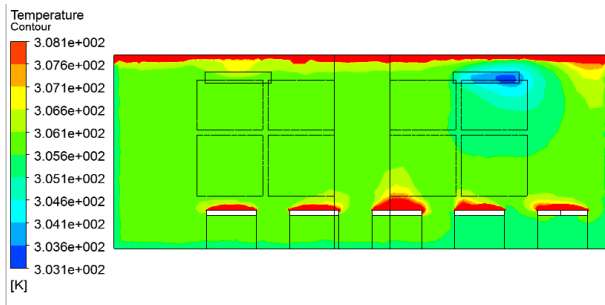


(case 2)Y=1.5m 截面圖

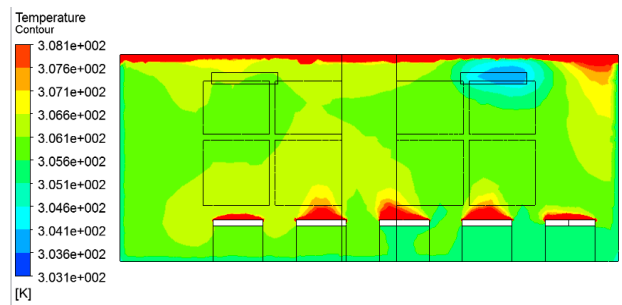


(case 7)Y=1.5m 截面圖

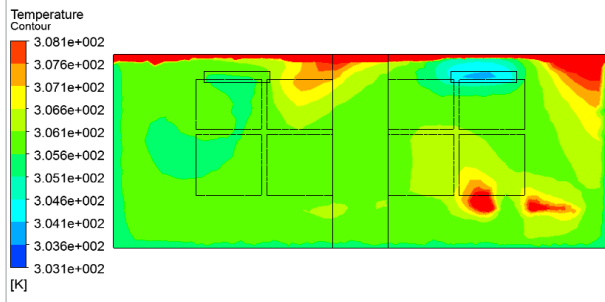
(a) 不同 Y 截面位置之溫度分布圖



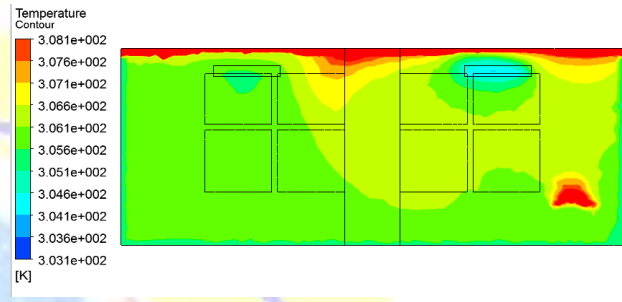
(case 2)X=2.0m 截面圖



(case 7)X=2.0m 截面圖



(case 2)X=5.7m 截面圖

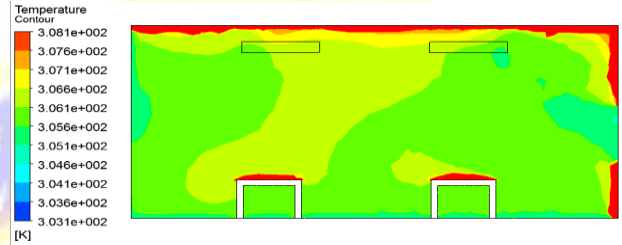


(case 7)X=5.7m 截面圖

(b)不同 X 截面位置之溫度分布圖



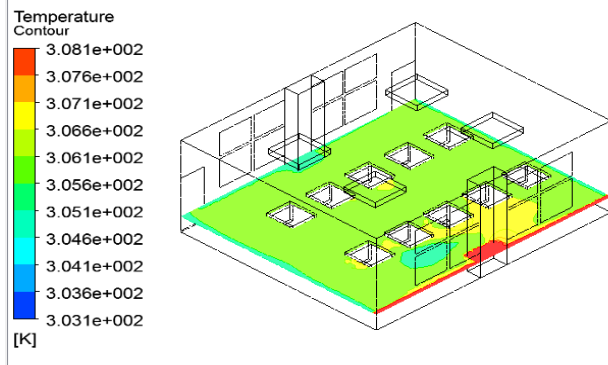
(case 2)Z=6.7m 截面圖



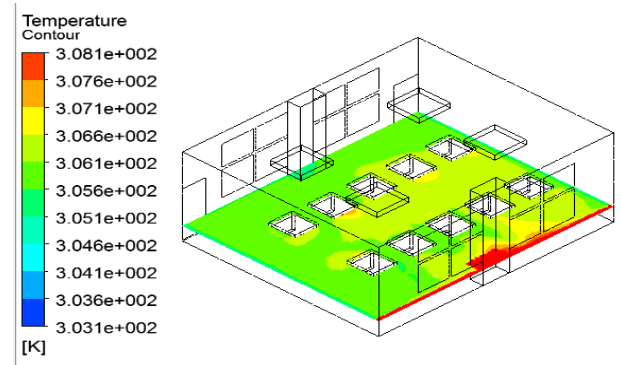
(case 7)Z=6.7m 截面圖

(c) Z 截面位置之溫度分布圖

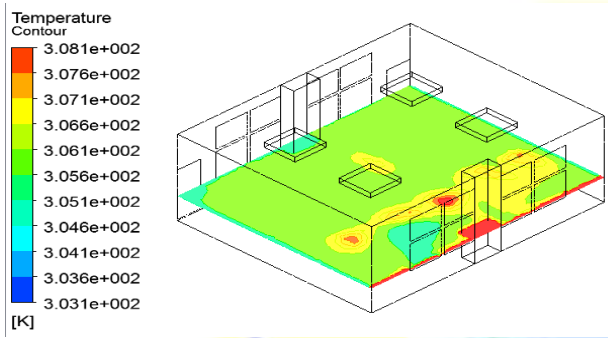
圖 4-8 case 2、case 7 溫度場分布圖(a)不同 Y 截面位置之溫度分布圖(b)不同 X 截面位置之溫度分布圖 (c) Z 截面位置之溫度分布圖



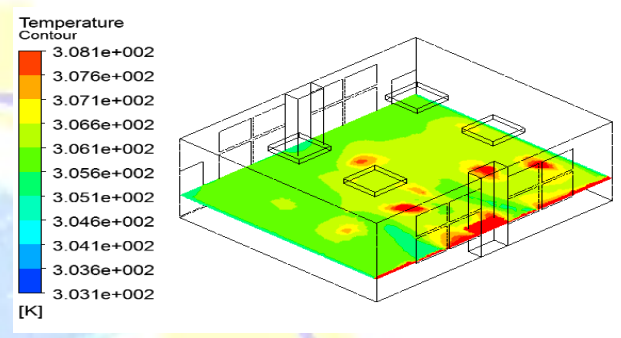
(case 3)Y=0.6m 截面圖



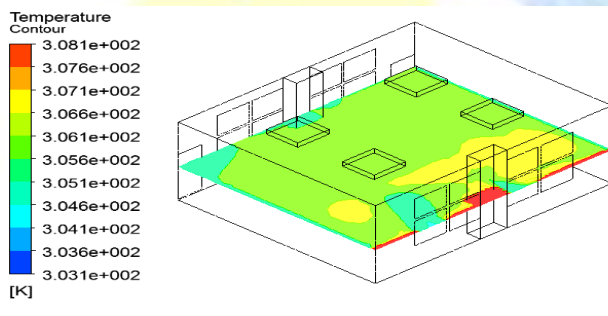
(case 8)Y=0.6m 截面圖



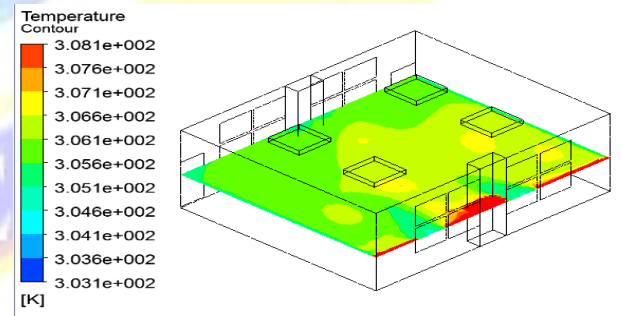
(case 3)Y=1.0m 截面圖



(case 8)Y=1.0m 截面圖

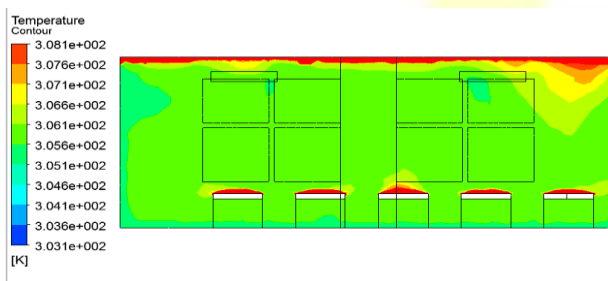


(case 3)Y=1.5m 截面圖

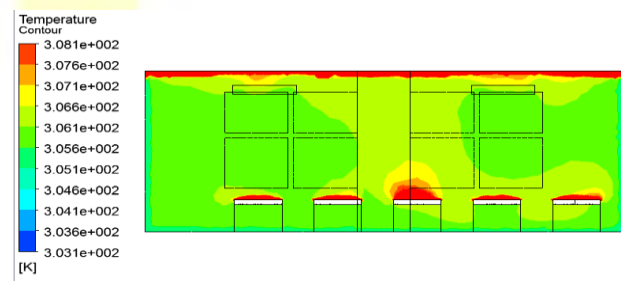


(case 8)Y=1.5m 截面圖

(a)不同 Y 截面位置之溫度分布

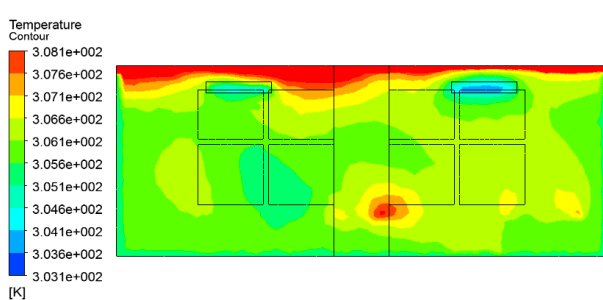


(case 3)X=2.0m 截面圖

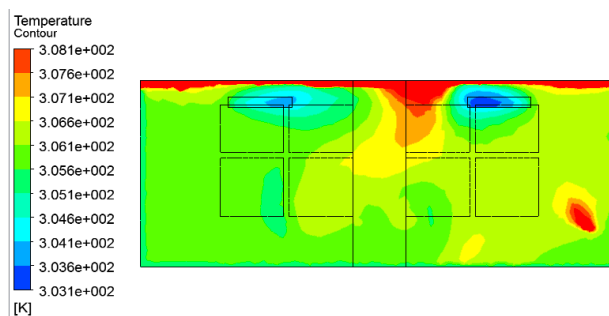


(case 8)X=2.0m 截面圖



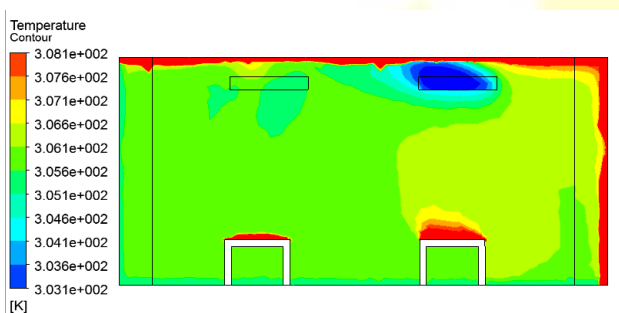


(case 3)X=5.7m 截面圖

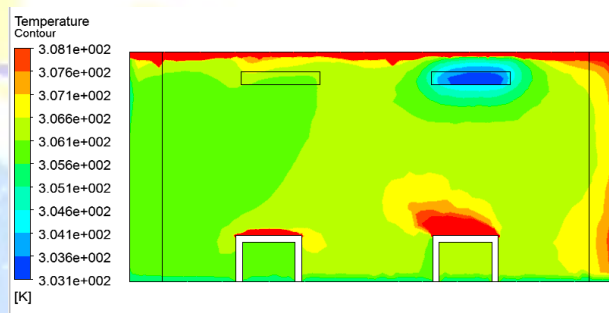


(case 8)X=5.7m 截面圖

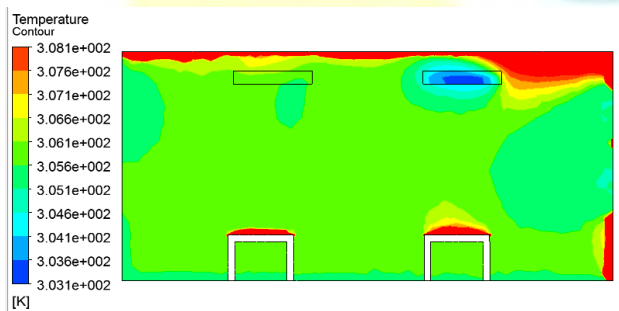
(b)不同 X 截面位置之溫度分布



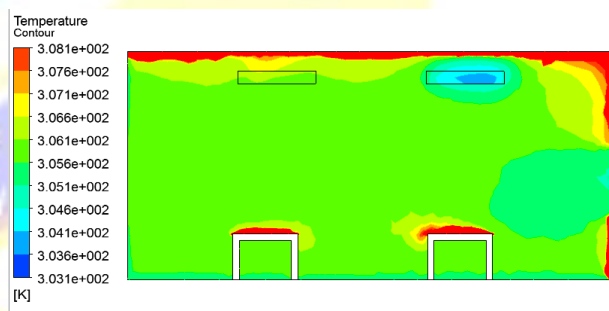
(case 3)Z=2.2m 截面圖



(case 8)Z=2.2m 截面圖



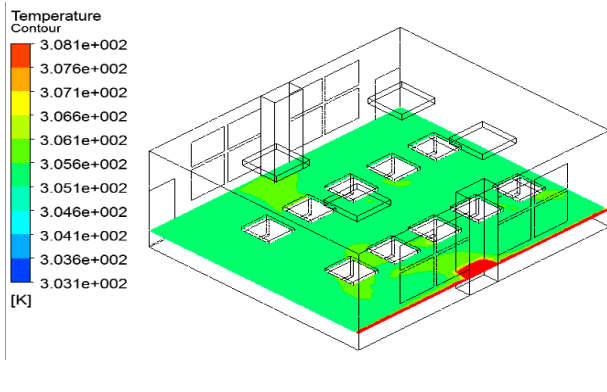
(case 3)Z=6.7m 截面圖



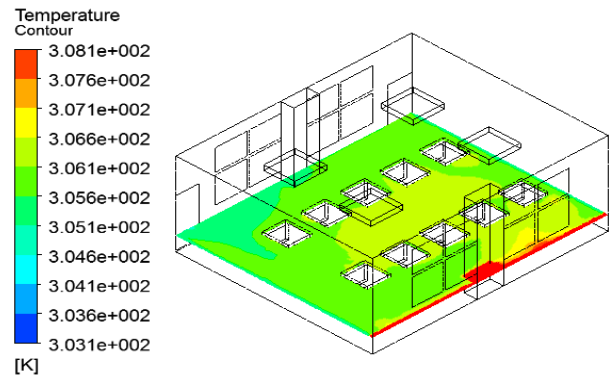
(case 8)Z=6.7m 截面圖

(c)不同 Z 截面位置之溫度分布

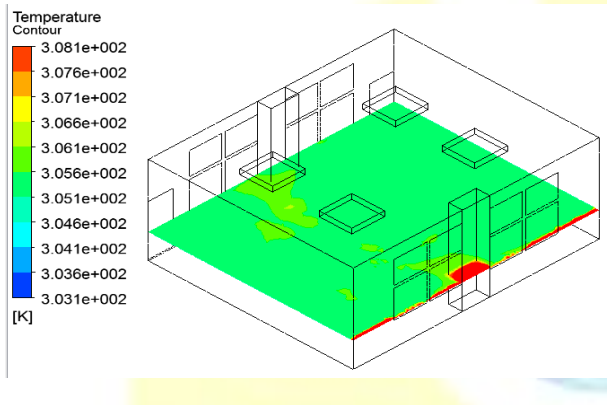
圖 4-9 case 3、case 8 之溫度分布圖(a)不同 Y 截面位置之溫度分布(b)不同 X 截面位置之溫度分布(c)不同 Z 截面位置之溫度分布



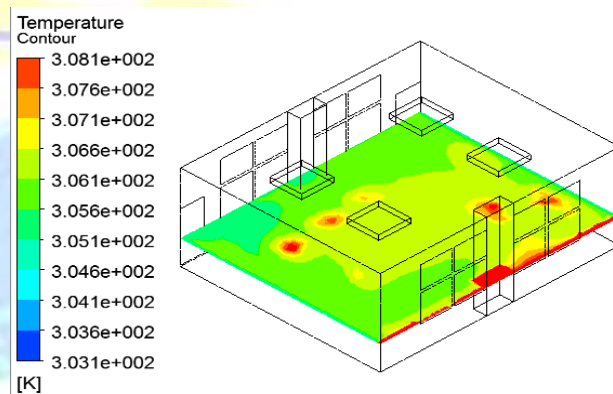
(case 4)Y=0.6m 截面圖



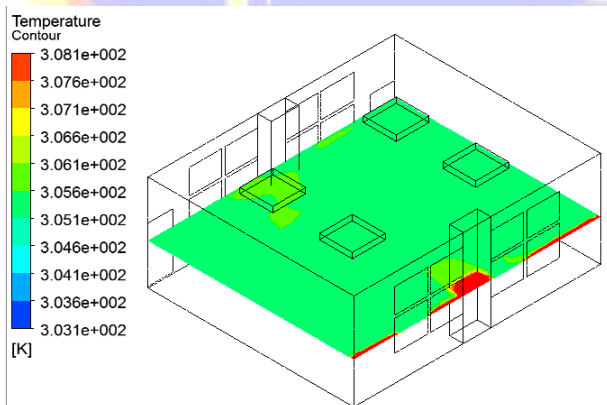
(case 9)Y=0.6m 截面圖



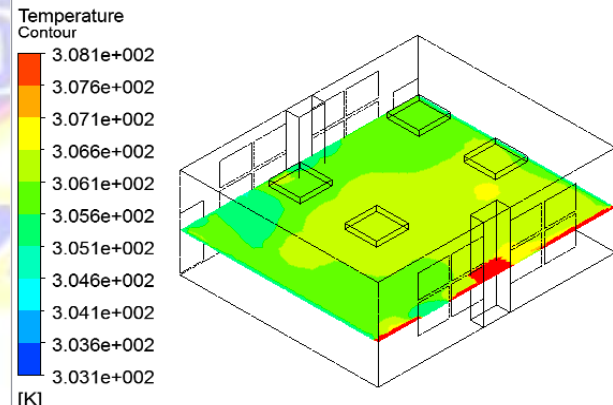
(case 4)Y=1.0m 截面圖



(case 9)Y=1.0m 截面圖

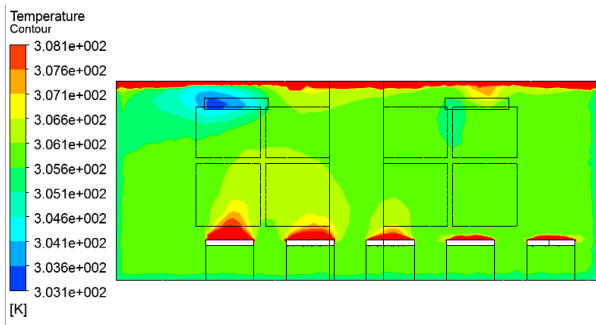


(case 4)Y=1.5m 截面圖

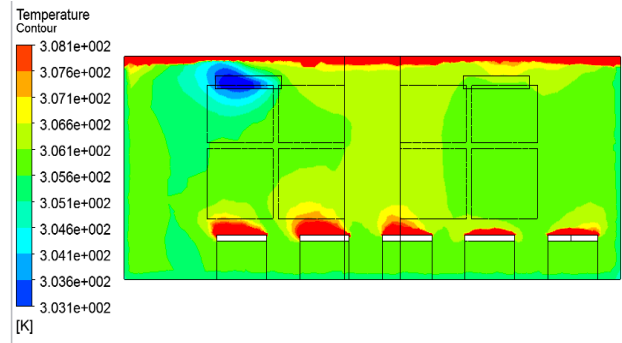


(case 9)Y=1.5m 截面圖

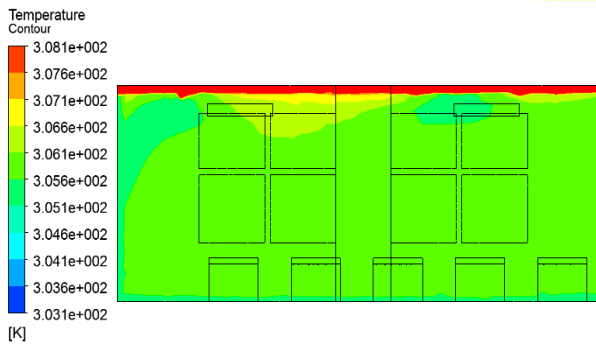
(a)不同 Y 截面位置之溫度分布



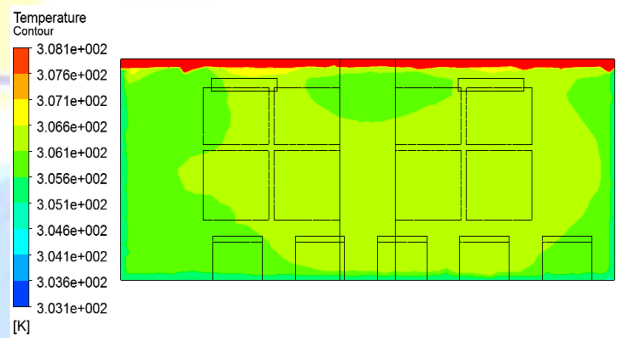
(case 4)X=2.0m 截面圖



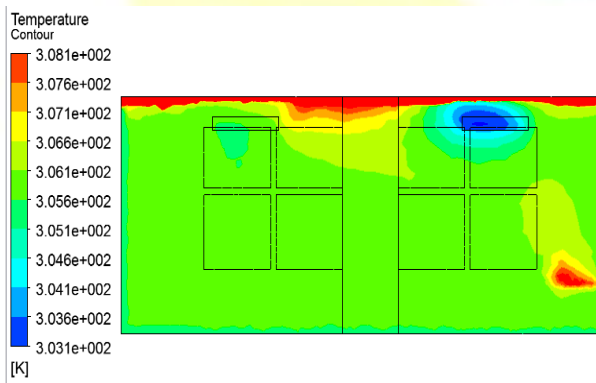
(case 9)X=2.0m 截面圖



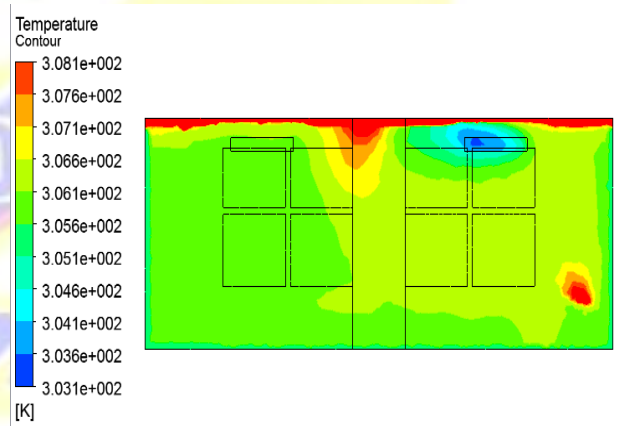
(case 4)X=3.75m 截面圖



(case 9)X=3.75m 截面圖

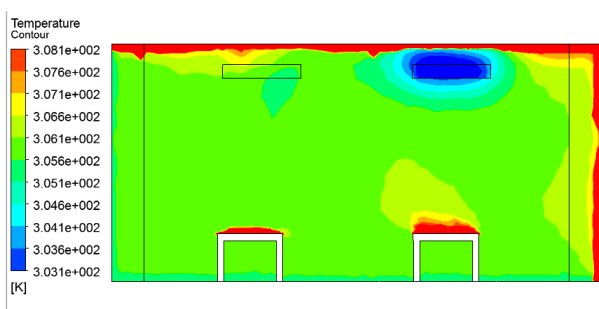


(case 4)X=5.7m 截面圖

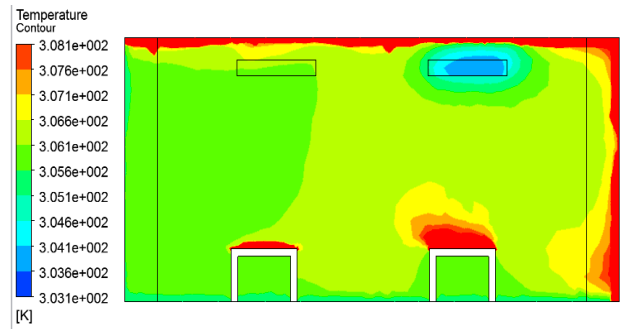


(case 9)X=5.7m 截面圖

(b)不同 X 截面位置之溫度分布



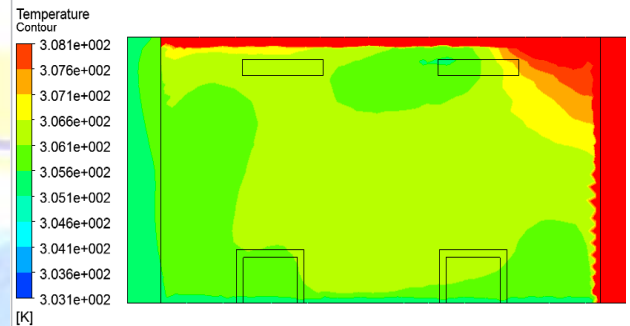
(case 4)Z=2.2m 截面圖



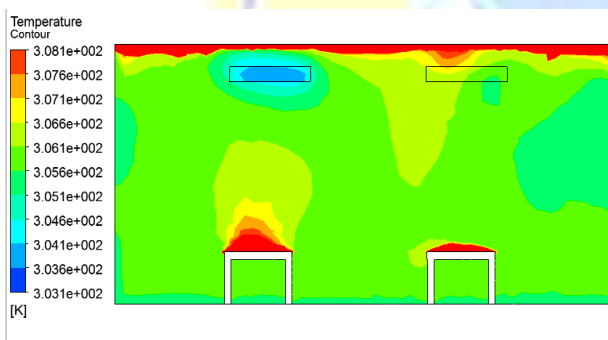
(case 9)Z=2.2m 截面圖



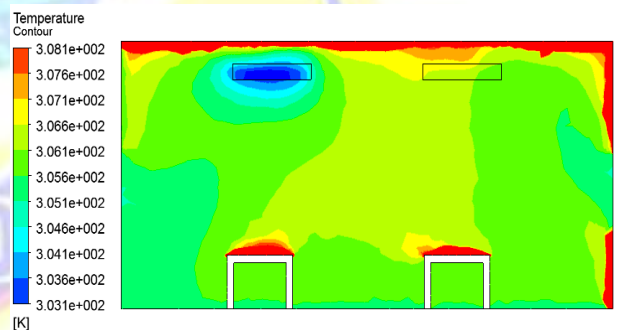
(case 4)Z=4.5m 截面圖



(case 9)Z=4.5m 截面圖



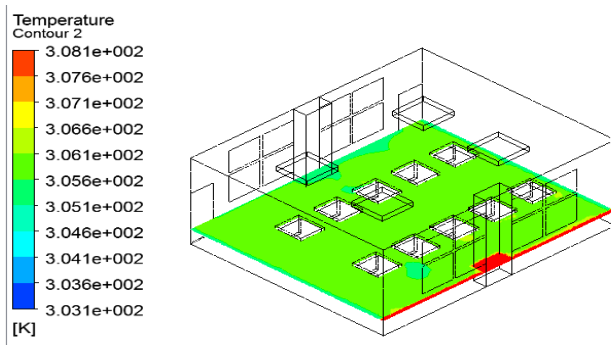
(case 4)Z=6.7m 截面圖



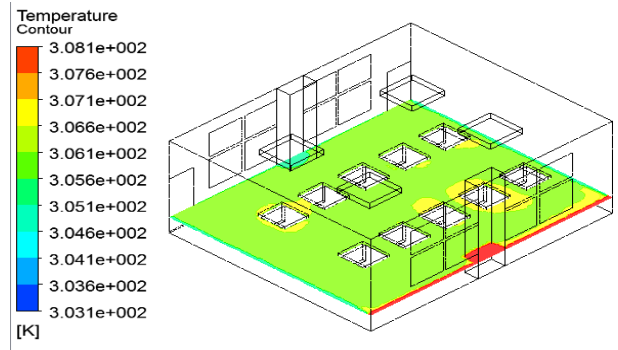
(case 9)Z=6.7m 截面圖

(c)不同 Z 截面位置之溫度分布

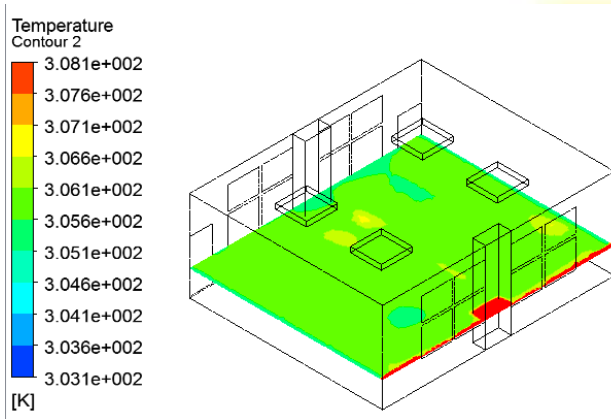
圖 4-10 case 4、case 9 之溫度分布圖(a)不同 Y 截面位置之溫度分布(b)不同 X 截面位置之溫度分布(c)不同 Z 截面位置之溫度分布



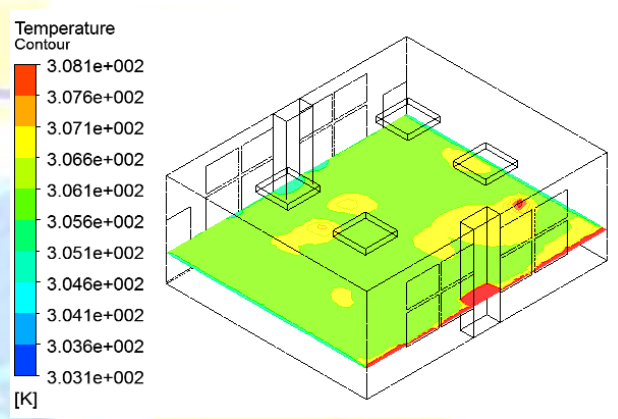
(case 5)Y=0.6m 截面圖



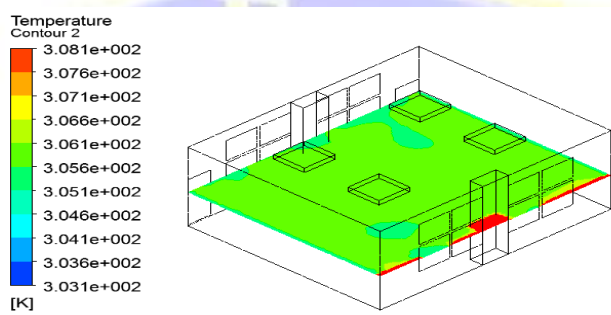
(case 10)Y=0.6m 截面圖



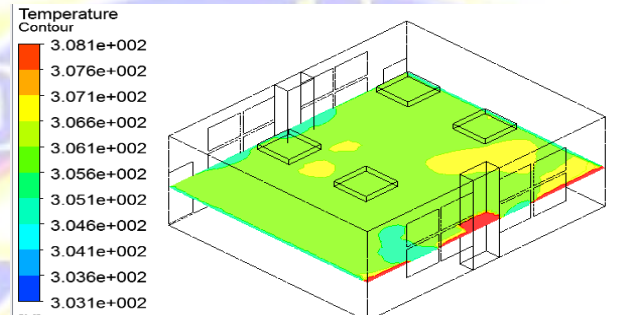
(case 5)Y=1.0m 截面圖



(case 10)Y=1.0m 截面圖



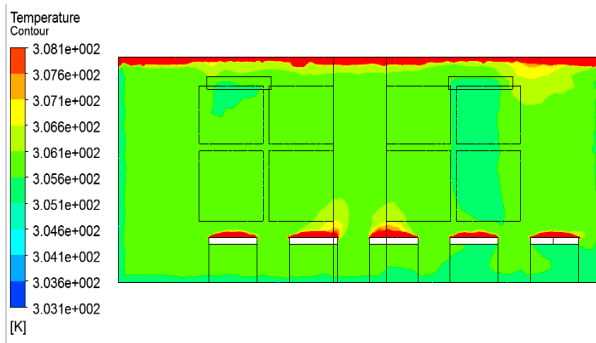
(case 5)Y=1.5m 截面圖



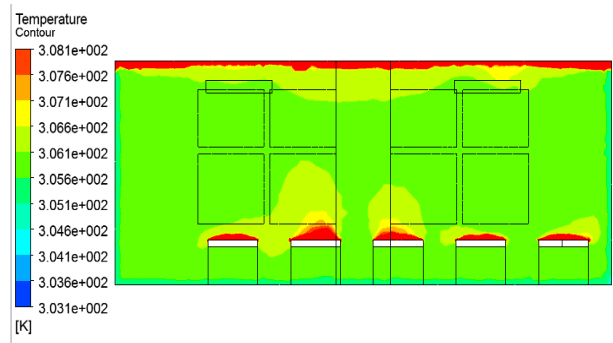
(case 10)Y=1.5m 截面圖

(a) 不同 Y 截面位置之溫度分布

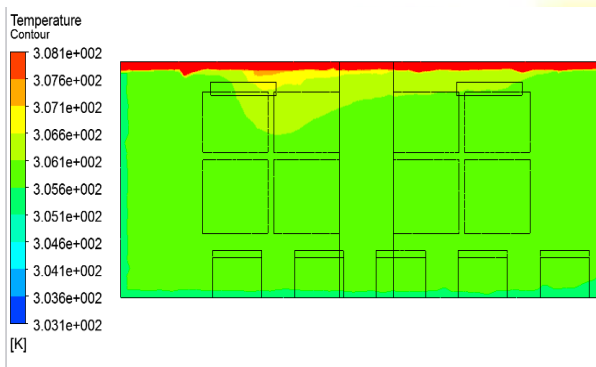




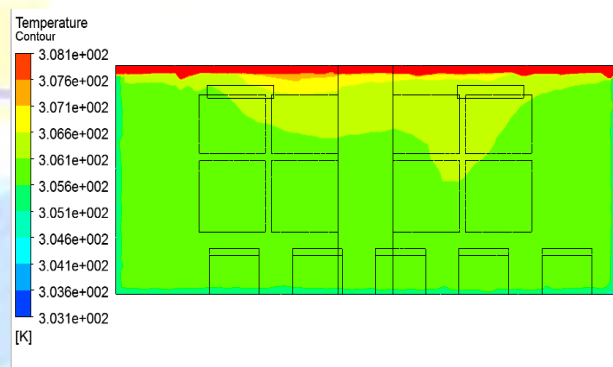
(case 5)X=2.0m 截面圖



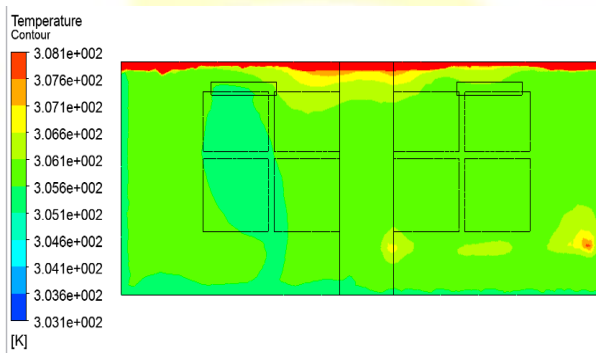
(case 10)X=2.0m 截面圖



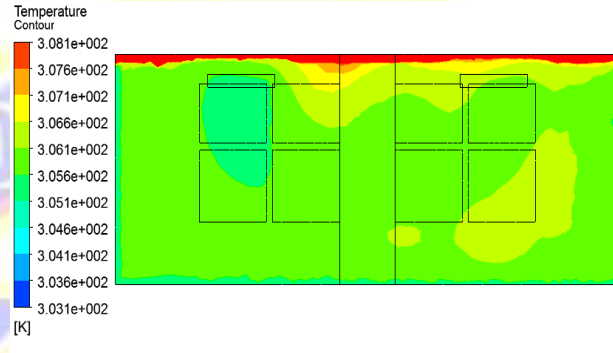
(case 5)X=3.75m 截面圖



(case 10)X=3.75m 截面圖

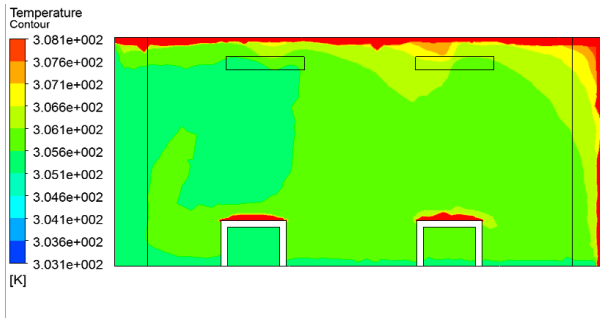


(case 5)X=5.7m 截面圖

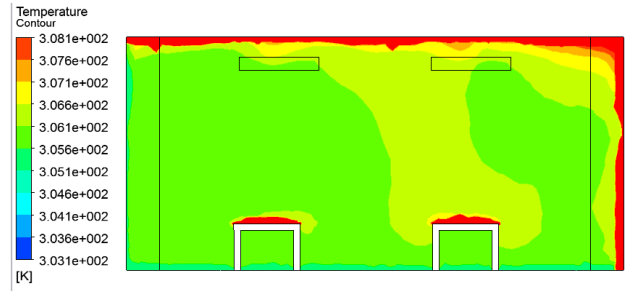


(case 10)X=5.7m 截面圖

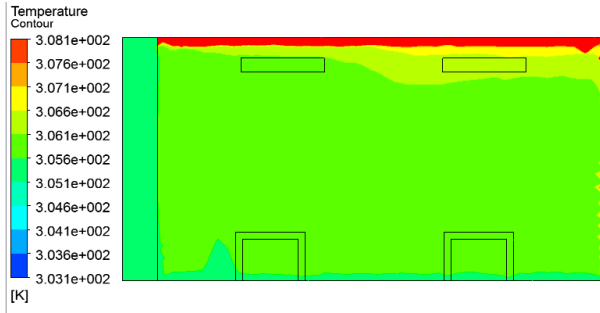
(b)不同 X 截面位置之溫度分布



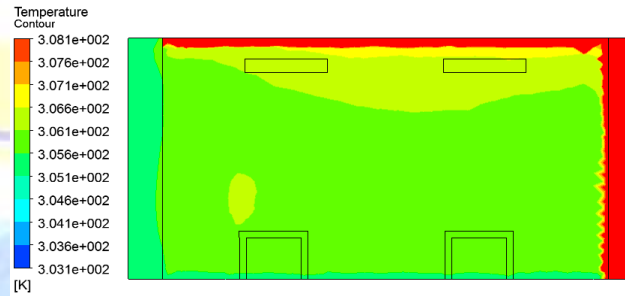
(case 5)Z=2.2m 截面圖



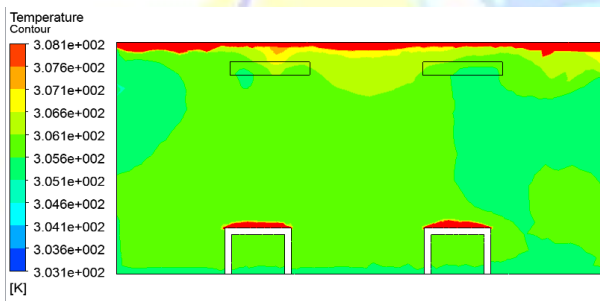
(case 10)Z=2.2m 截面圖



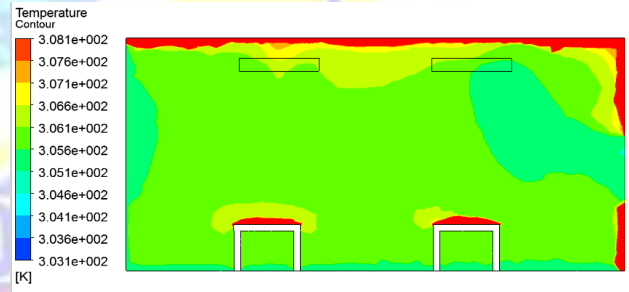
(case 5)Z=4.5m 截面圖



(case 10)Z=4.5m 截面圖



(case 5)Z=6.7m 截面圖



(case 10)Z=6.7m 截面圖

(c)不同 Z 截面位置之溫度分布

圖 4-11 case 5、case 10 之溫度分布圖(a)不同 Y 截面位置之溫度分布(b)不同 X 截面位置之溫度分布(c)不同 Z 截面位置之溫度分布

## 4-2 上氣窗對室內通風效益之影響

### 4-2-1 速度場分析

從圖 4-12 各案例之 CFD 數值解析之不同 Y 截面速度場結果(a)case 1~case 5 可以發現，在桌面高度也就是  $Y=0.6\text{m}$  區域間的流場速度為:case 5 > case 4 > case 2 > case 3 > case 1；而在坐姿呼吸帶也就是  $Y=1.0\text{m}$  區域間的流場速度為:case 5 > case 4 > case 2 > case 3 > case 1，而且  $Y=1.0\text{m}$  區域上的流速都高於  $Y=0.6\text{m}$ ，此現象為自然對流效益所影響；在站立高度也就是  $Y=1.5\text{m}$  區域間的流場速度為:case 5 > case 4 > case 2 > case 3 > case 1，但此區域的流速並沒有比  $Y=1.0\text{m}$  區域上的流速快，可能在此區域的流場速度擾動而降低其速度。

從圖(b)case 6~case 10 可以發現，在桌面高度也就是  $Y=0.6\text{m}$  區域間的流場速度為:case 10 > case 9 > case 7 > case 8 > case 6；而在坐姿呼吸帶也就是  $Y=1.0\text{m}$  區域間的流場速度為:case 10 > case 9 > case 7 > case 8 > case 6，而且  $Y=1.0\text{m}$  區域上的流速都高於  $Y=0.6\text{m}$ ，此現象為自然對流效益所影響；在站立高度也就是  $Y=1.5\text{m}$  區域間的流場速度為:case 10 > case 9 > case 8 > case 7 > case 6，其流速也都比  $Y=1.0\text{m}$  區域還快，這是因為自然對流效益的影響。

從圖 4-12 各案例之 CFD 數值解析之不同 Y 截面速度場結果(a)case 1~case 5(b)case 6~case 10 可以發現，圖(a) case 1~case 5 上的最低速度與最高速度都高過於(b)case 6~case 10，這可能跟開口部的不同有關係。

從圖 4-13 各案例之 CFD 數值解析之不同 X 截面速度場結果(a)case 1~case 5 可以發現，吊扇 2、4 區域也就是  $X=2.0\text{m}$  區域間的流場速度為:case 5 > case 3 > case 4 > case 2 > case 1，是因為 case 5 開啟吊扇 1、2、3、4，case 3 開啟吊扇 2、4，case 4 開啟吊扇 1、4，case 2 開啟吊扇 1、2，增加空氣對流使得風速加快； $X=3.75\text{m}$  的區域位於教室的中間與黑板垂直區域，其流場速度為:case 5 > case 2 > case 4 > case 3 > case 1；而在吊扇 1、3 區域也就是  $X=5.7\text{m}$  區域間的流場速度為:case 5 > case 4 > case 2 > case 3 > case 1，這是因為開啟吊扇使得空氣對流增加，速度也跟著變快。

從圖(b)case 6 ~ case 10 可以發現，吊扇 2、4 區域也就是  $X=2.0\text{m}$  區域間的流場速度為: case 10 > case 8 > case 7 > case 9 > case 6，是因為 case 10 開啟吊扇 1、2、3、4，case 8 開啟吊扇 2、4，case 7 開啟吊扇 1、2，case 9 開啟吊扇 1、4，增加空氣對流使得風速加快； $X=3.75\text{m}$  的區域位於教室的中間與黑板垂直區域，其流場速度為: case 10 > case 9 > case 8 > case 7 > case 6，case 9 因為開啟對角吊扇所以在此中間區域受到空氣的擾動而有較快的流速產生；而在吊扇 1、3 區域也就是  $X=5.7\text{m}$  區域間的流場速度為: case 10 > case 9 > case 7 > case 8 > case 6。

從圖 4-14 各案例之 CFD 數值解析之不同 Z 截面速度場結果(a)case 1 ~ case 5 可以發現，吊扇 3、4 的區域也就是  $Z=2.2\text{m}$  區域間的流場速度為: case 5 > case 4 > case 3 > case 2 > case 1，因為 case 5 吊扇全開、case 4 開啟吊扇 1、4，case 3 開啟吊扇 2、4，而 case 2 因為開啟吊扇 1、2 不在此區域所以速度只比 case 1 自然通風快而已； $Z=4.5\text{m}$  區域位於教室左右兩側柱子的區域上，其流場速度為: case 5 > case 4 > case 2 > case 3 > case 1，其速度明顯降低很多，因為此處的通風不良；吊扇 1、2 的區域也就是  $Z=6.7\text{m}$  區域間的流場速度為: case 5 > case 2 > case 4 > case 3 > case 1，因為 case 5 吊扇全開，而 case 2 開啟吊扇 1、2 剛好就在此區域，所以兩模組的速度相當接近，而 case 4 開啟吊扇 1、4，與 case 3 開啟 2、3 也都有一支吊扇在此區域，所以其速度也相當接近。

從圖(b)case 6 ~ case 10 可以發現，吊扇 3、4 的區域也就是  $Z=2.2\text{m}$  區域間的流場速度為: case 10 > case 9 > case 8 > case 7 > case 6，因為 case 7 開啟吊扇 1、2 不在此區域，所以其流速與自然通風的 case 1 相當接近； $Z=4.5\text{m}$  區域位於教室左右兩側柱子的區域上，其流場速度為: case 10 > case 7 > case 9 > case 8 > case 6，其速度明顯降低很多，因為此處的通風不良，但 case 7 在此區的速度比在  $Z=2.2\text{m}$  快；吊扇 1、2 的區域也就是  $Z=6.7\text{m}$  區域間的流場速度為: case 10 > case 7 > case 8 > case 9 > case 6，因為 case 10 吊扇全開，而 case 7 開啟吊扇 1、2 剛好就在此區域，所以兩模組的速度相當接近。

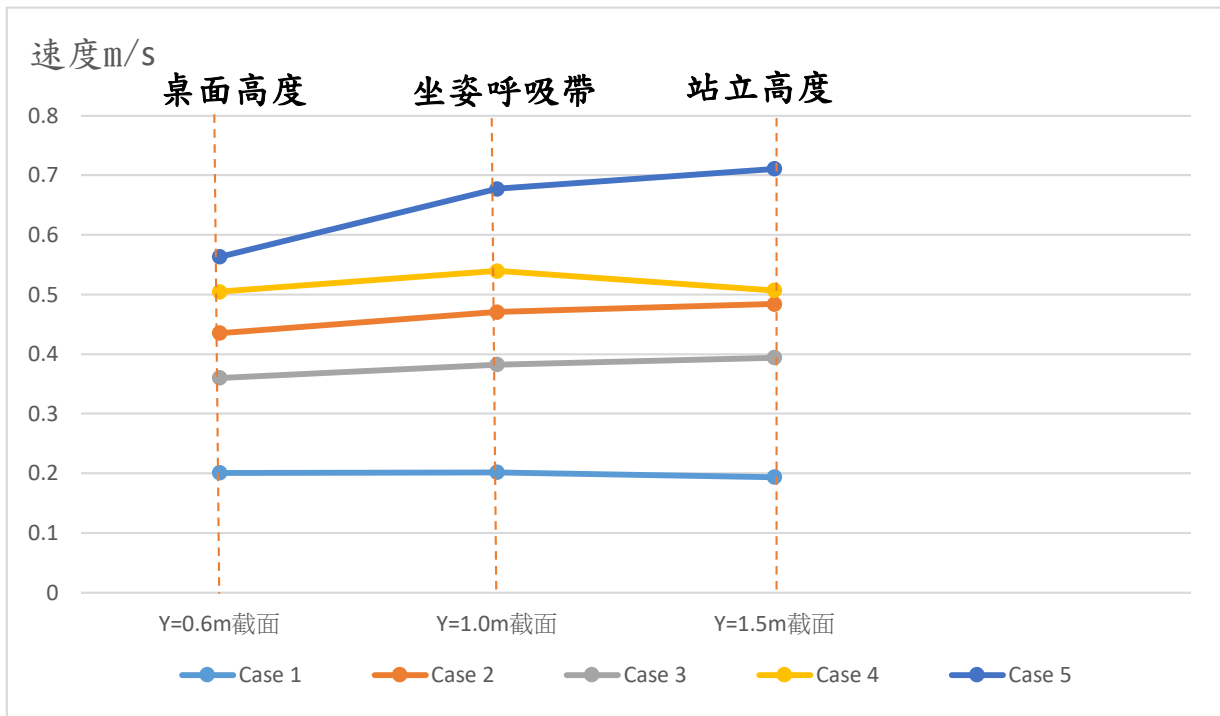
將開啟上氣窗與採光窗跟只開啟採光窗兩不同開口部的模組以曲線圖做比較，如圖 4-15~19 所示:從圖 4-15 可以發現，case 1 的速度在每一個截面上都比 case 6 還要快；從圖

4-16 則發現，case 2 的速度高於 case 7；圖 4-17 則顯示，case 8 流速稍微高於 case 3；圖 4-18 則顯示，case 4 的流場速度高於 case 9；最後圖 4-19 也是顯示，case 5 的流場速度高於 case 10。

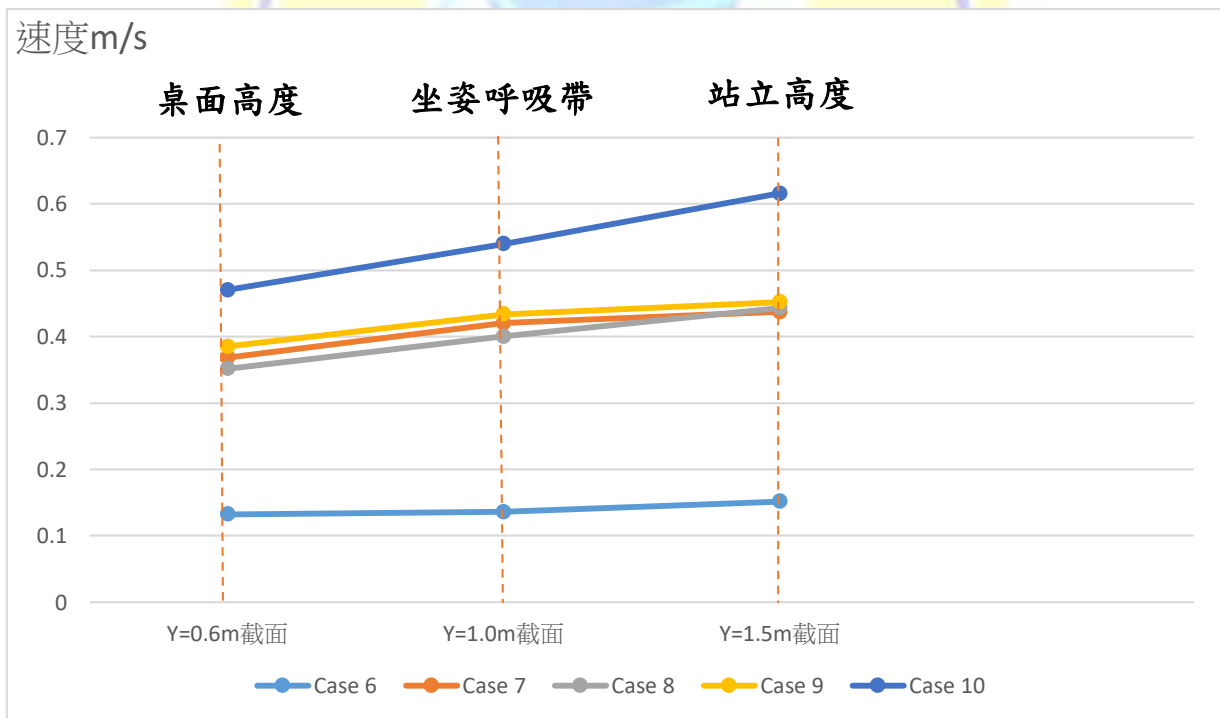
由以上的曲線圖分析可以發現，當窗戶全部開啟時，如果沒有開任何吊扇，而是藉由自然通風的方式產生對流作用，則其流場的速度會比只開採光窗的流場速度稍微快一點。而當窗戶全部開啟時，再搭配吊扇的使用，讓教室以混合通風的方式增加空氣對流作用，則流場的速度也會比只開採光窗的流場速度快。而 case 3 和 case 8 的結果則跟其他模組有些許的不同，在  $X=2.0\text{m}$  區域也就是吊扇 2、4 區域，case 3 的流速高於 case 8，但其餘截面幾乎都是 case 8 的流速稍微高一點，這可能是因為沒有開啟上氣窗與吊扇增加空氣對流擾動變大而增加速度。





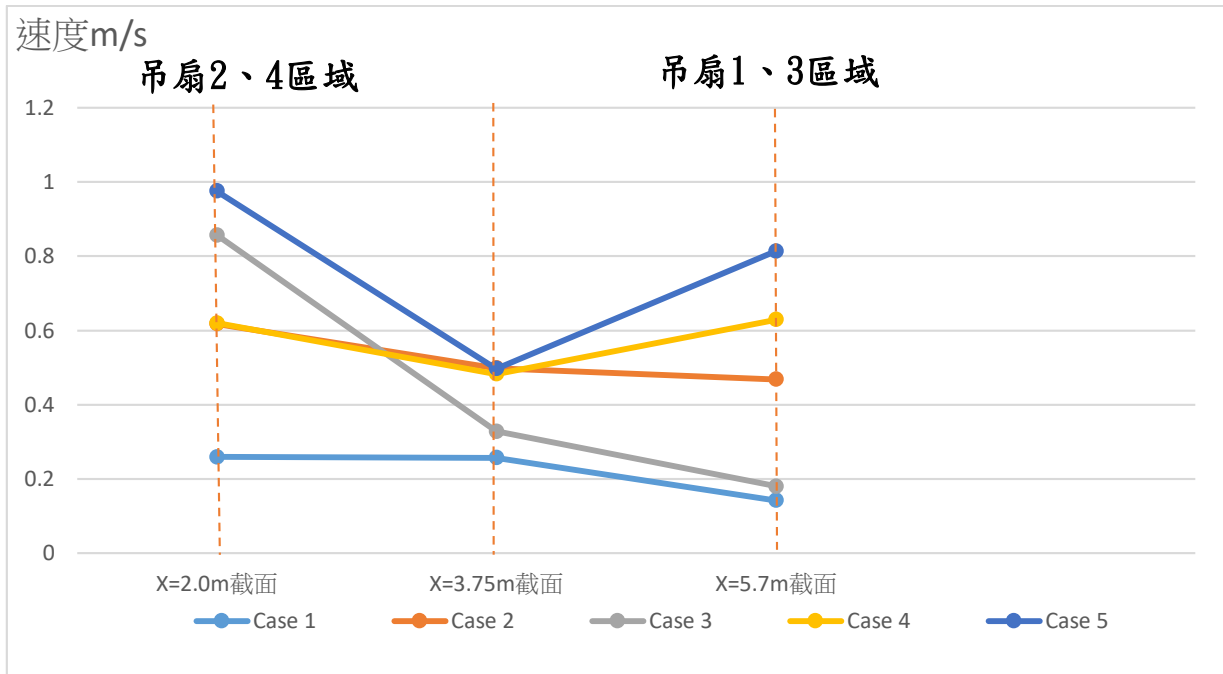


(a) case 1 ~ case 5

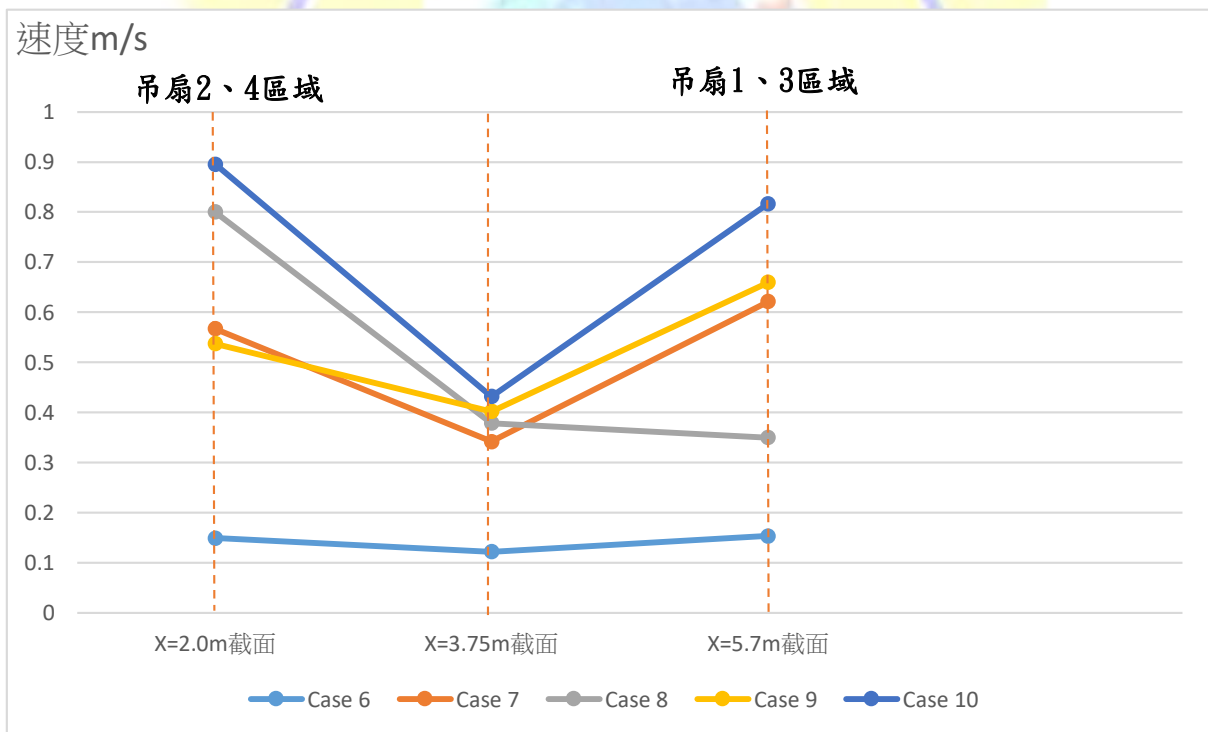


(b) case 6 ~ case 10

圖 4-12 各案例之 CFD 數值解析之不同 Y 截面速度場結果(a)case 1 ~ case5 (b)case 6 ~ case 10

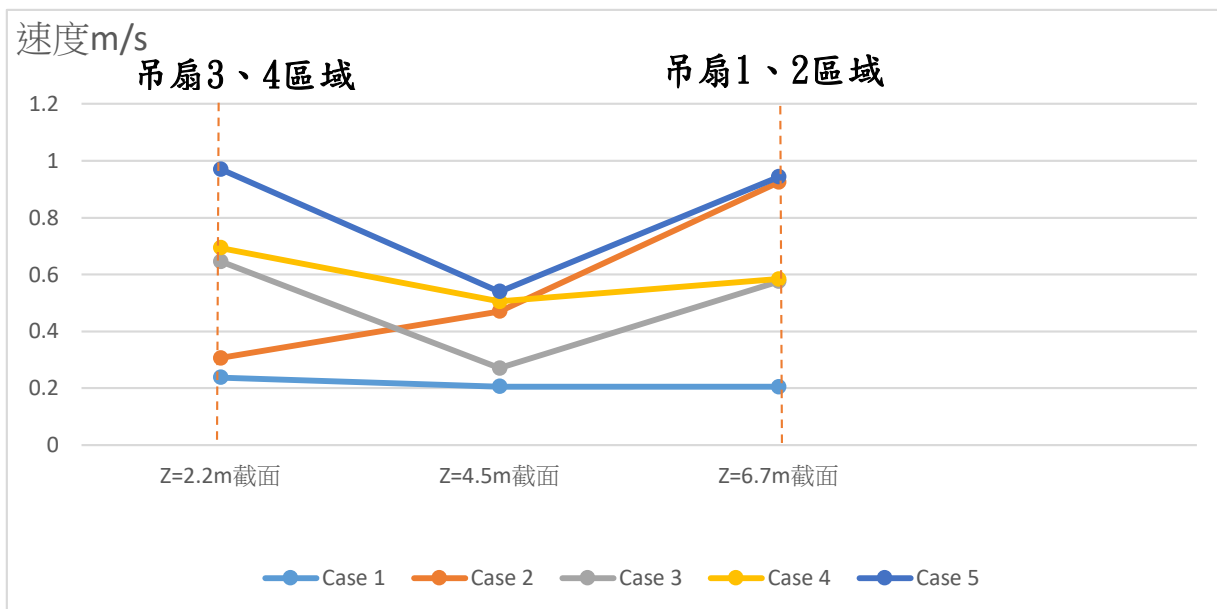


(a)case 1 ~ case 5

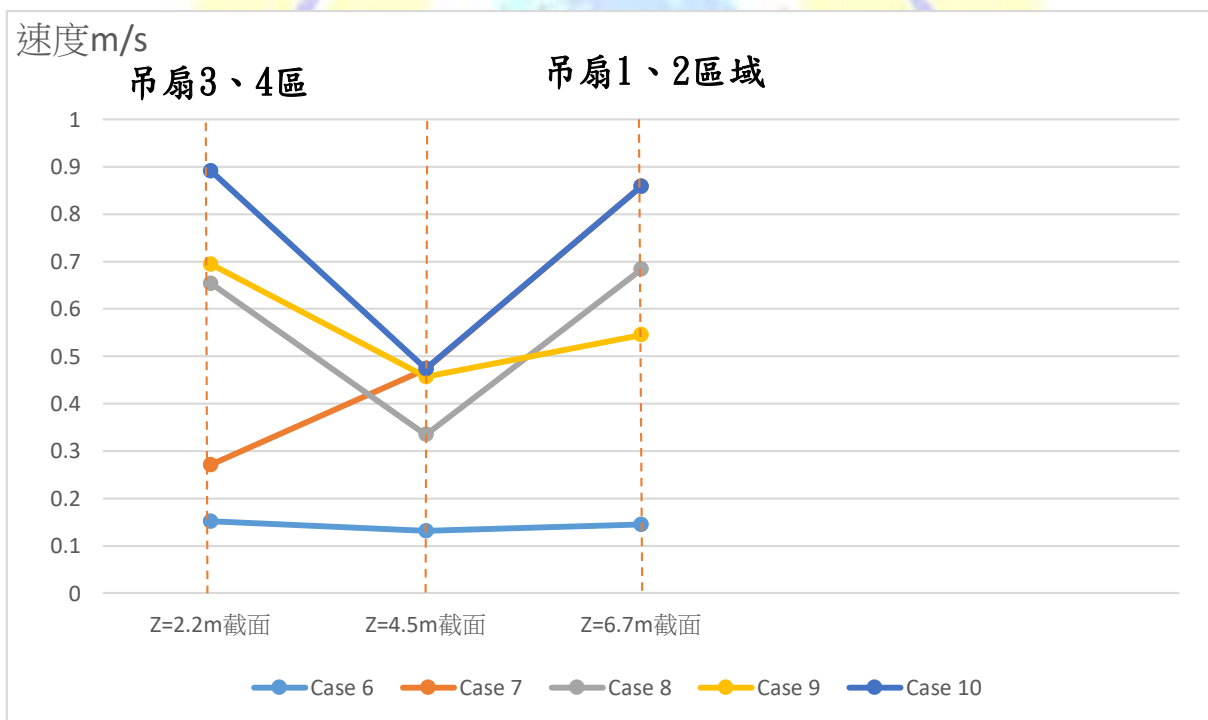


(b)case 6 ~ case 10

圖 4-13 各案例之 CFD 數值解析之不同 X 截面速度場結果(a)case 1 ~ case5 (b)case 6 ~ case 10



(a)case 1 ~ case 5



(b)case 6 ~ case 10

圖 4-14 各案例之 CFD 數值解析之不同 Z 截面速度場結果(a)case 1 ~ case5 (b)case 6 ~ case 10

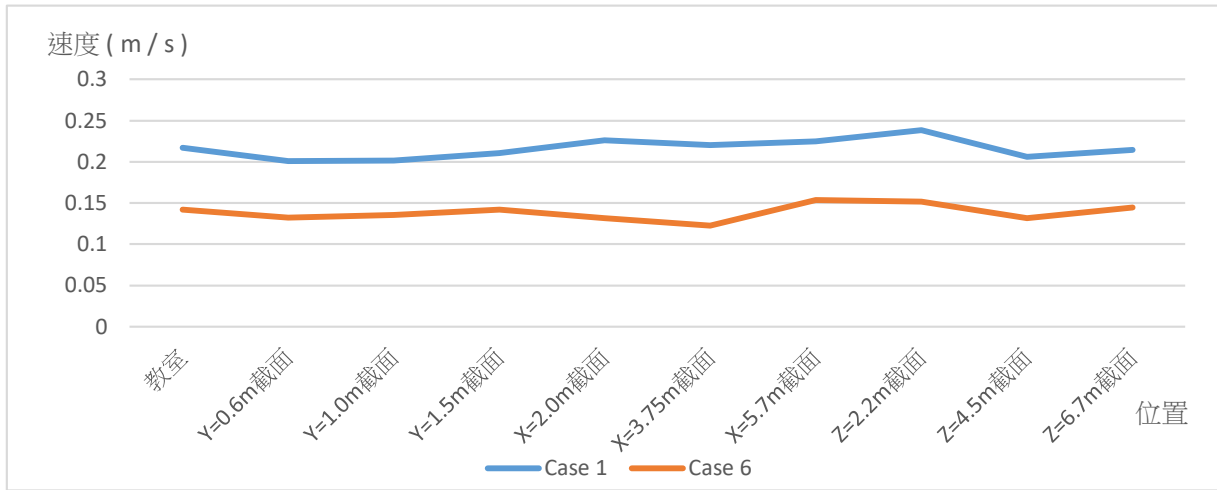


圖 4-15 case 1、case 6 速度場數值比較

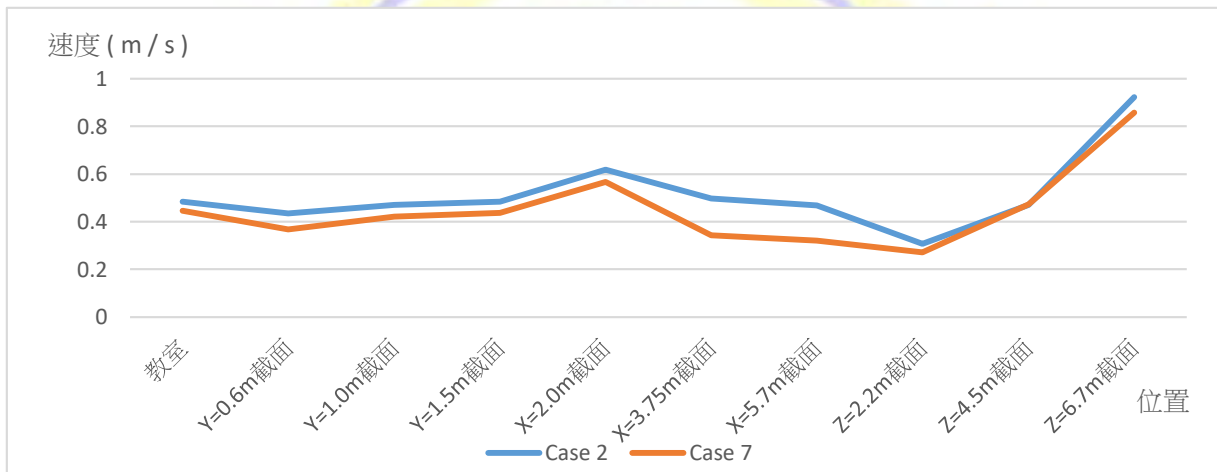


圖 4-16 case 2、case 7 速度場數值比較

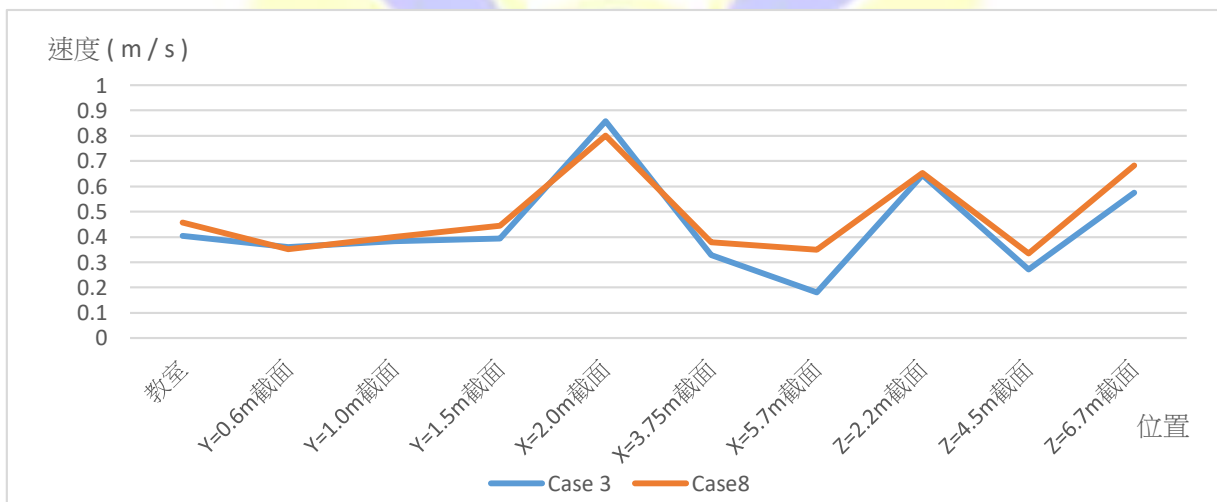


圖 4-17 case 3、case 8 速度場數值比較

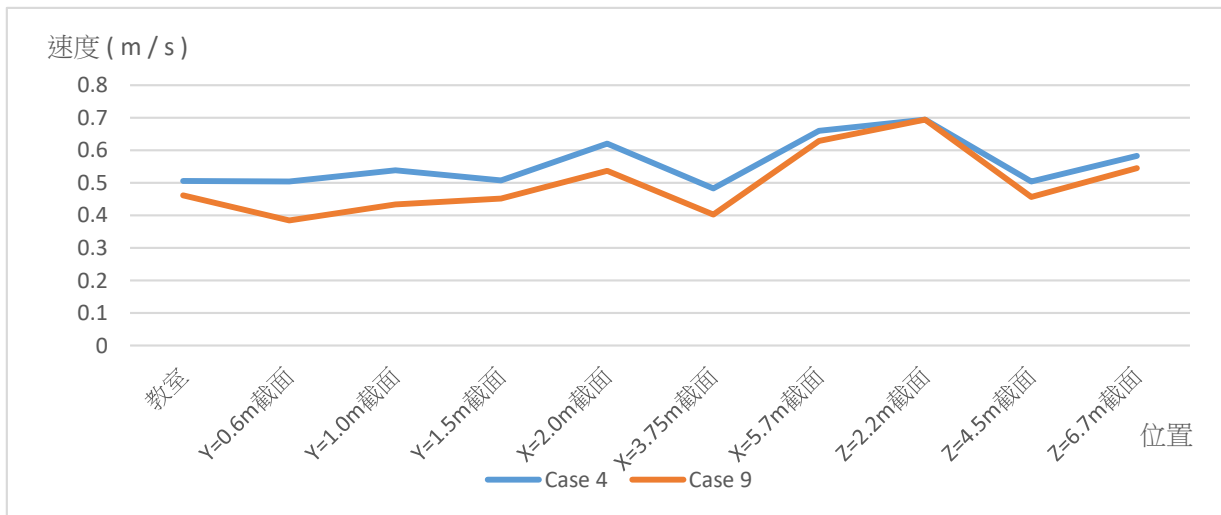


圖 4-18 case 4、case 9 速度場數值比較

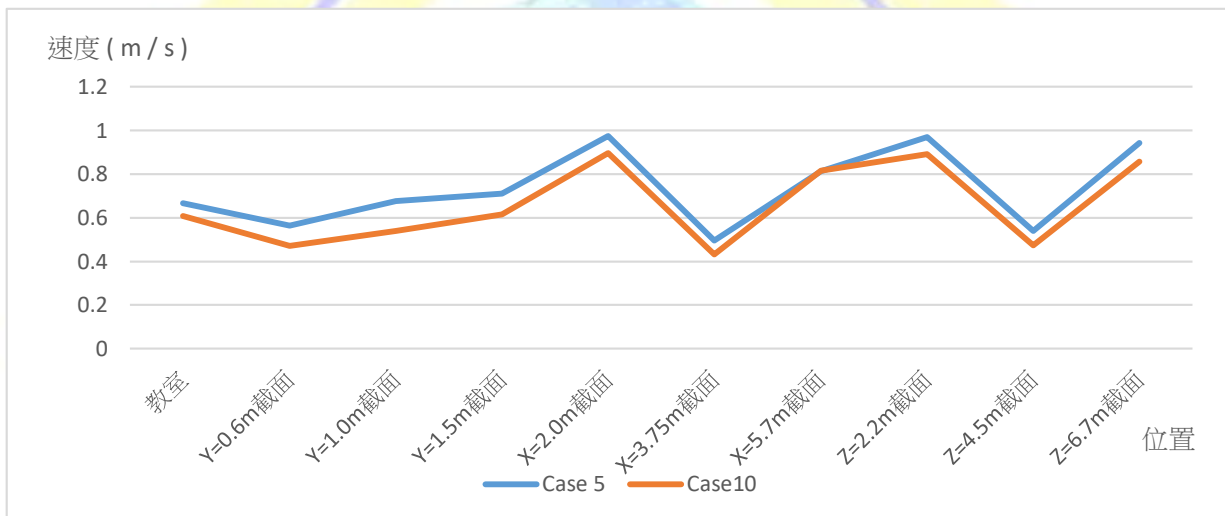


圖 4-19 case 5、case 10 速度場數值比較



## 4-2-2 溫度場分析

由從圖 4-20 各案例之 CFD 數值解析之不同 Y 截面之溫度曲線圖(a)case 1 ~ case 5 可以發現，垂直高度  $Y=0.6\text{m}$  也就是桌面高度位置，其溫度變化為  $\text{case } 5 < \text{case } 2 < \text{case } 4 < \text{case } 3 < \text{case } 1$ ；垂直高度  $Y=1.0\text{m}$  也就是學生坐姿時的呼吸帶位置，其溫度變化為  $\text{case } 5 < \text{case } 2 < \text{case } 4 < \text{case } 3 < \text{case } 1$ ；而其垂直高度  $Y=1.5\text{m}$  也就是學生站立時的高度位置，其溫度變化為  $\text{case } 5 < \text{case } 2 < \text{case } 4 < \text{case } 3 < \text{case } 1$ 。其中  $Y=1.0\text{m}$  此處位置因位於發熱面的稍為上方處的關係，所以溫度較高。

從圖(b) case 6 ~ case 10 可以發現，在桌面高度也就是  $Y=0.6\text{m}$  區域間的溫度場為： $\text{case } 10 < \text{case } 7 < \text{case } 9 < \text{case } 8 < \text{case } 6$ ；而在坐姿呼吸帶也就是  $Y=1.0\text{m}$  區域間的溫度場溫度為： $\text{case } 10 < \text{case } 7 < \text{case } 9 < \text{case } 8 < \text{case } 6$ ；在站立高度也就是  $Y=1.5\text{m}$  區域間的溫度場溫度為： $\text{case } 10 < \text{case } 7 < \text{case } 9 < \text{case } 8 < \text{case } 6$ 。其中  $Y=1.0\text{m}$  此處位置也是因為位於發熱面的稍為上方處的關係，所以溫度較高。

從圖 4-21 各案例之 CFD 數值解析之不同 X 截面溫度場結果(a)case 1 ~ case 5 可以發現，吊扇 2、4 區域也就是  $X=2.0\text{m}$  區域間的溫度場為： $\text{case } 5 < \text{case } 2 < \text{case } 3 < \text{case } 4 < \text{case } 1$ ； $X=3.75\text{m}$  的區域位於教室的中間與黑板垂直區域，其溫度場溫度為： $\text{case } 5 < \text{case } 2 < \text{case } 4 < \text{case } 3 < \text{case } 1$ ；而在吊扇 1、3 區域也就是  $X=5.7\text{m}$  區域間的溫度場溫度為： $\text{case } 5 < \text{case } 4 < \text{case } 2 < \text{case } 3 < \text{case } 1$  這是因為自然對流效益的影響。

從圖(b)case 6 ~ case 10 可以發現，吊扇 2、4 區域也就是  $X=2.0\text{m}$  區域間的溫度場為： $\text{case } 10 < \text{case } 7 < \text{case } 9 < \text{case } 8 < \text{case } 1$ ； $X=3.75\text{m}$  的區域位於教室的中間與黑板垂直區域，其溫度場溫度為： $\text{case } 10 < \text{case } 9 \leq \text{case } 7 < \text{case } 8 < \text{case } 1$ ；而在吊扇 1、3 區域也就是  $X=5.7\text{m}$  區域間的溫度場溫度為： $\text{case } 10 < \text{case } 9 \leq \text{case } 7 < \text{case } 8 < \text{case } 1$  這是因為自然對流效益的影響。

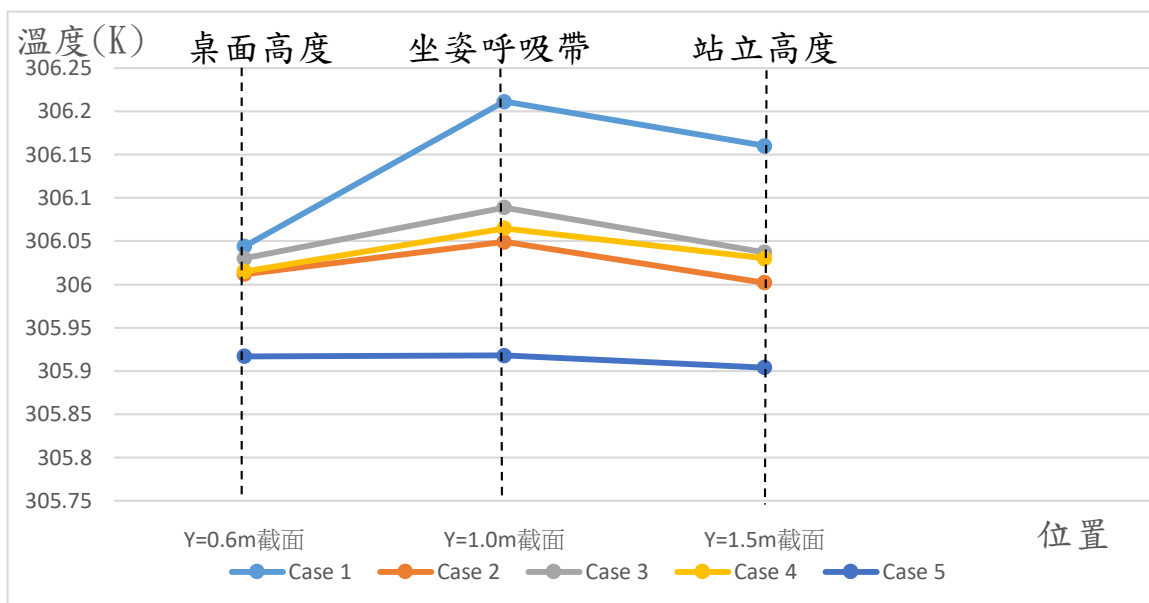
從圖 4-22 各案例之 CFD 數值解析之不同 Z 截面溫度場結果(a)case 1 ~ case 5 可以發現，吊扇 3、4 的區域也就是  $Z=2.2\text{m}$  區域間溫度場溫度為： $\text{case } 5 < \text{case } 4 < \text{case } 3 < \text{case } 2 < \text{case } 1$ ，因為 case 5 吊扇全開、case 4 開啟吊扇 1、4，case 3 開啟吊扇 2、4，而 case 2 因

為開啟吊扇 1、2 未在此區域所以溫度只比 case 1 自然通風低而已；Z=4.5m 區域位於教室左右兩側柱子的區域上，其溫度場溫度為：case 5 < case 4 < case 2 < case 3 < case 1；吊扇 1、2 的區域也就是 Z=6.7m 區域間的溫度場溫度為：case 5 < case 2 < case 3 < case 4 < case 1，因為 case 2 開啟吊扇 1、2 剛好位於此區域因此其溫度較低。

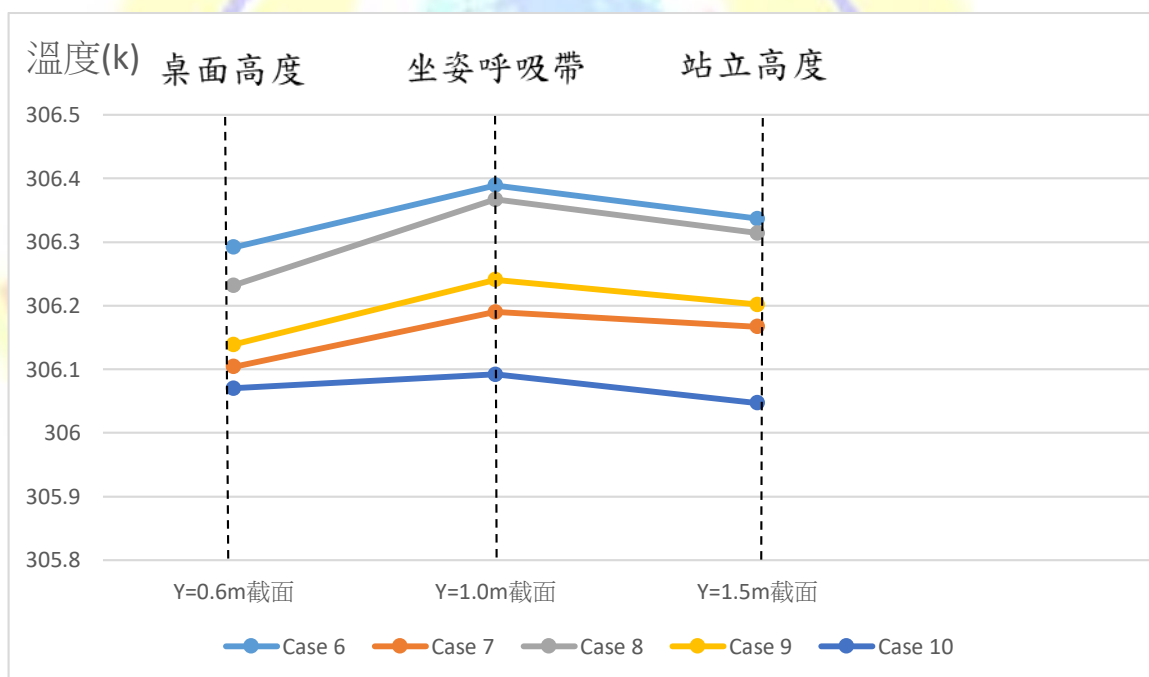
從圖(b)case 6~case 10 可以發現，吊扇 3、4 的區域也就是 Z=2.2m 區域間溫度場溫度為：case 10 < case 9 < case 8 < case 7 < case 6，因為 case 10 吊扇全開、case 9 開啟吊扇 1、4，case 8 開啟吊扇 2、4，而 case 7 因為開啟吊扇 1、2 未在此區域所以溫度只比 case 6 自然通風低而已；Z=4.5m 區域位於教室左右兩側柱子的區域上，其溫度場溫度為：case 10 < case 9 < case 7 < case 8 < case 6；吊扇 1、2 的區域也就是 Z=6.7m 區域間的溫度場溫度為：case 10 < case 7 < case 8 < case 9 < case 6，因為 case 7 開啟吊扇 1、2 剛好位於此區域因此其溫度較低。

將開啟上氣窗與採光窗跟只開啟採光窗兩不同開口部的模組以曲線圖做比較，如圖 4-23~27 所示：從圖 4-23 可以發現，case 6 的溫度在每一個截面上都比 case 1 還要高；從圖 4-24 則發現，case 7 的溫度高於 case 2；圖 4-25 則顯示，case 8 溫度高於 case 3；圖 4-26 則顯示，case 9 的溫度高於 case 4；最後圖 4-27 也是顯示，case 10 的溫度場溫度高於 case 5。

綜合上述分析歸納出：開啟上氣窗與採光窗的溫度場明顯都比只開啟採光窗的溫度還要低，因此對於開啟上氣窗是否影響教室內的通風效益，答案是肯定的。

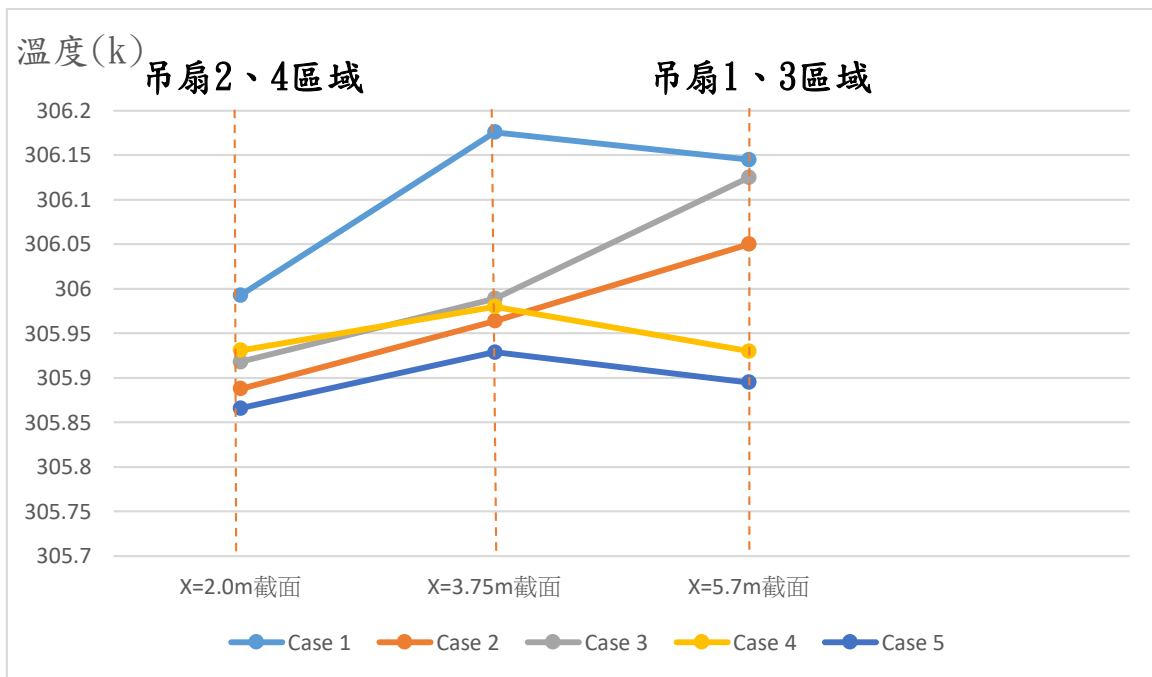


(a) case 1 ~ case 5

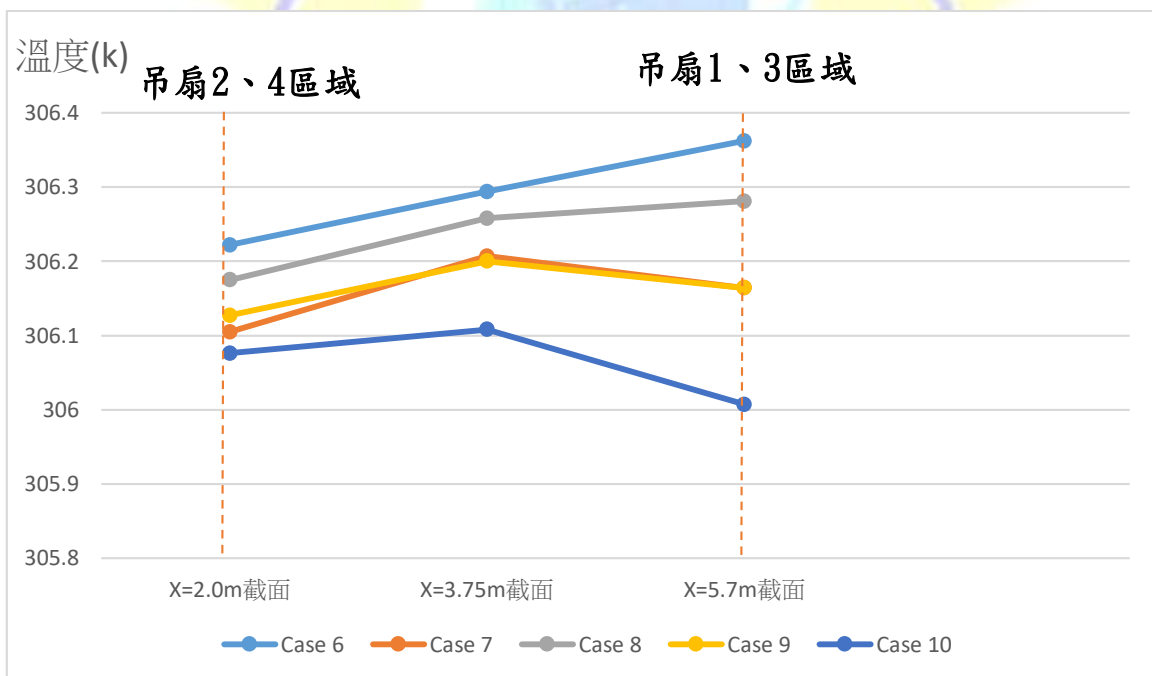


(b) case 6 ~ case 10

圖 4-20 各案例之 CFD 數值解析之不同 Y 截面之溫度曲線圖(a)case 1 ~ case5 (b) case 6 ~ case 10

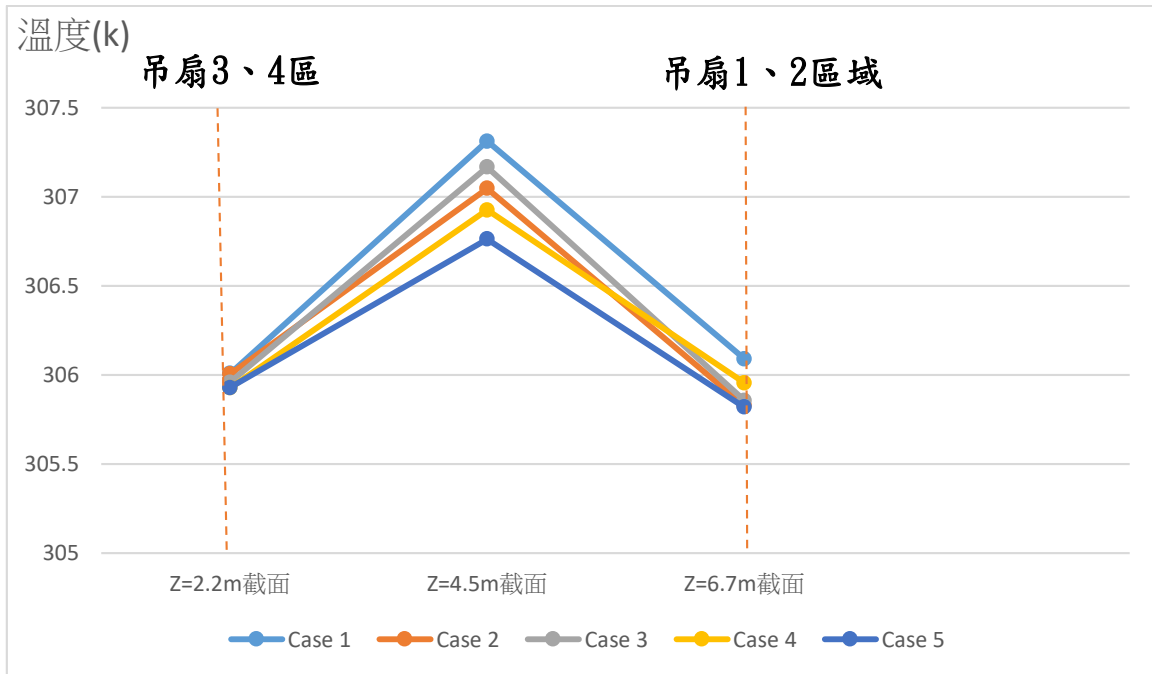


(a)case 1 ~ case 5

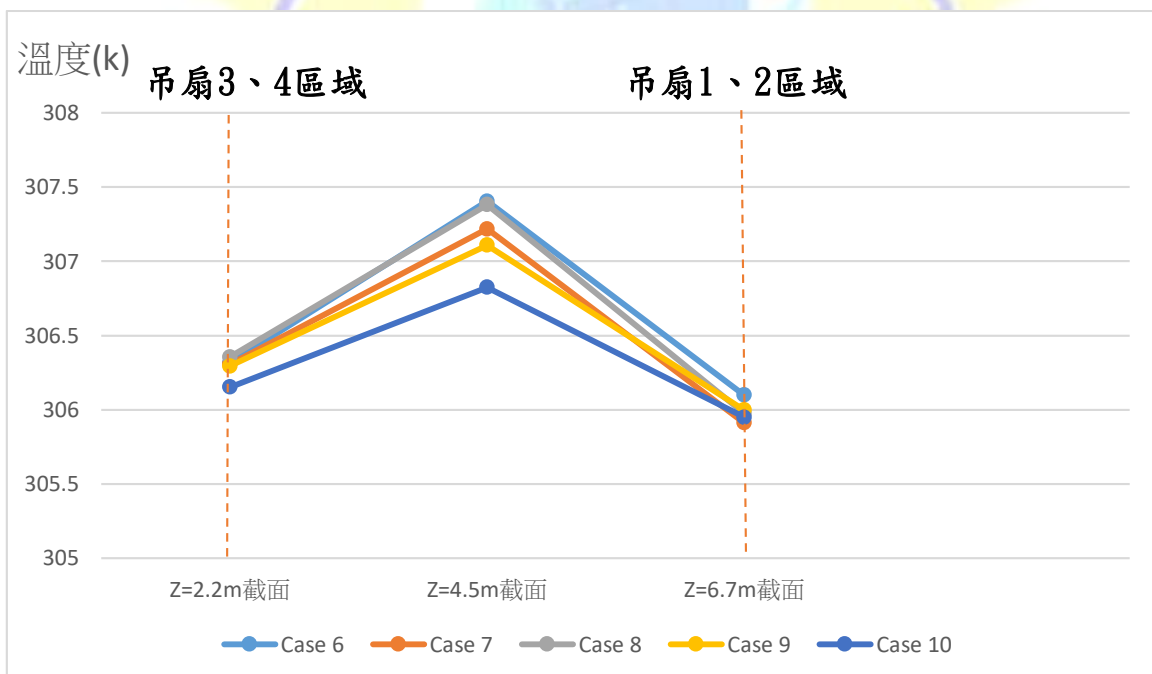


(b)case 6 ~ case 10

圖 4-21 各案例之 CFD 數值解析之不同 X 截面溫度場結果(a)case 1 ~ case5  
(b)case 6 ~ case 10



(a) case 1 ~ case 5



(b) case 6 ~ case 10

圖 4-22 各案例之 CFD 數值解析之不同 Z 截面溫度場結果(a)case 1 ~ case5  
(b)case 6 ~ case 10



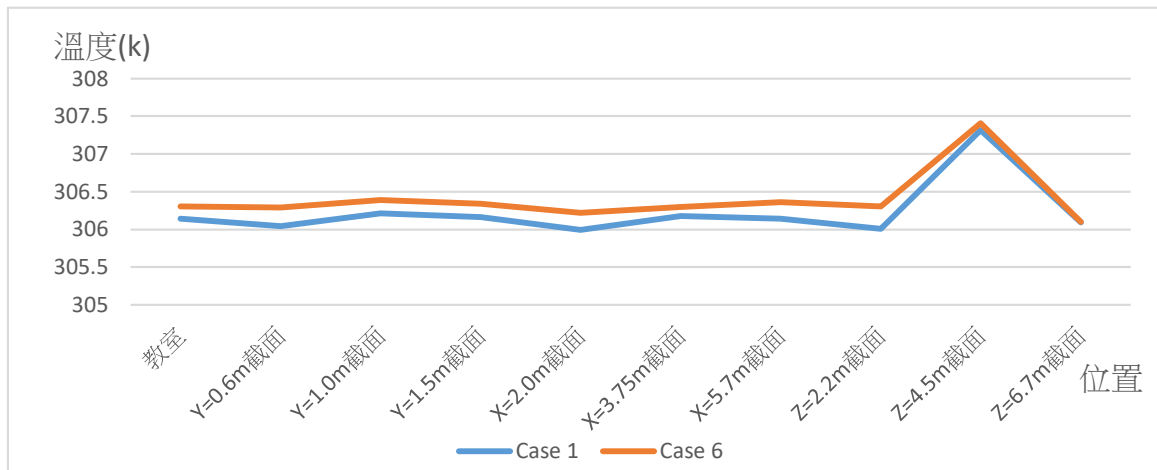


圖 4-23 case 1、case 6 的溫度場數值比較

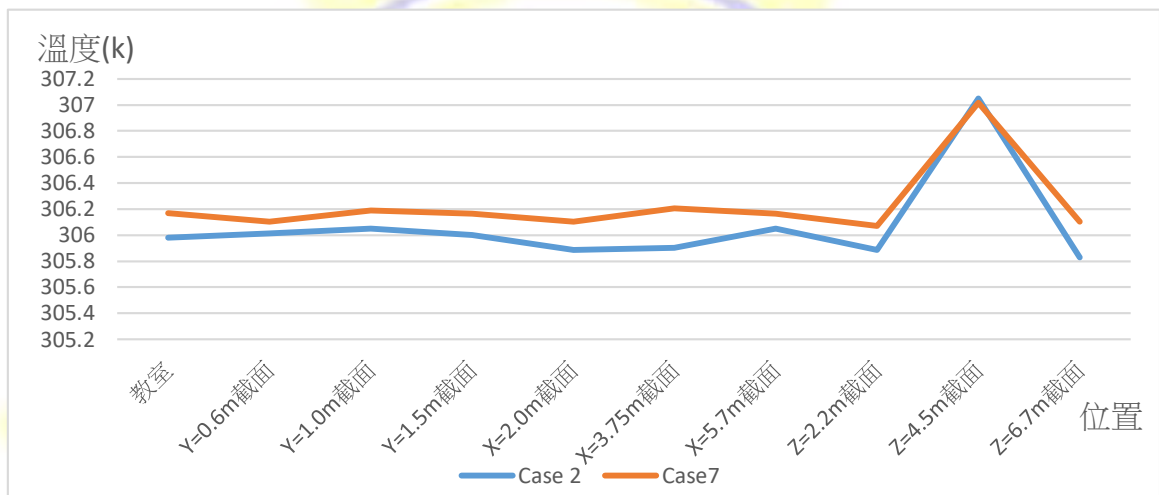


圖 4-24 case 2、case 7 的溫度場數值比較

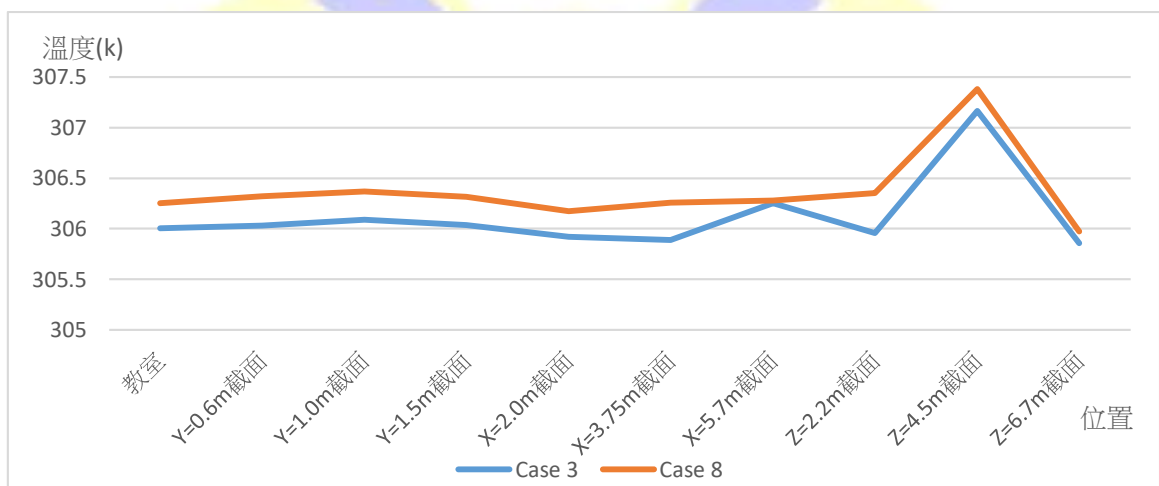


圖 4-25 case 3、case 8 的溫度場數值比較

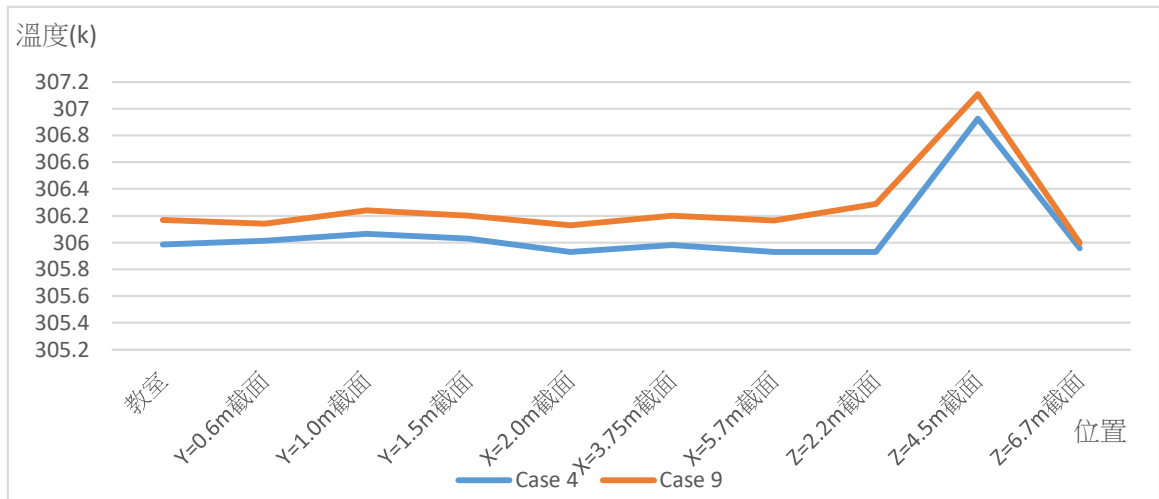


圖 4-26 case 4、case 9 的溫度場數值比較

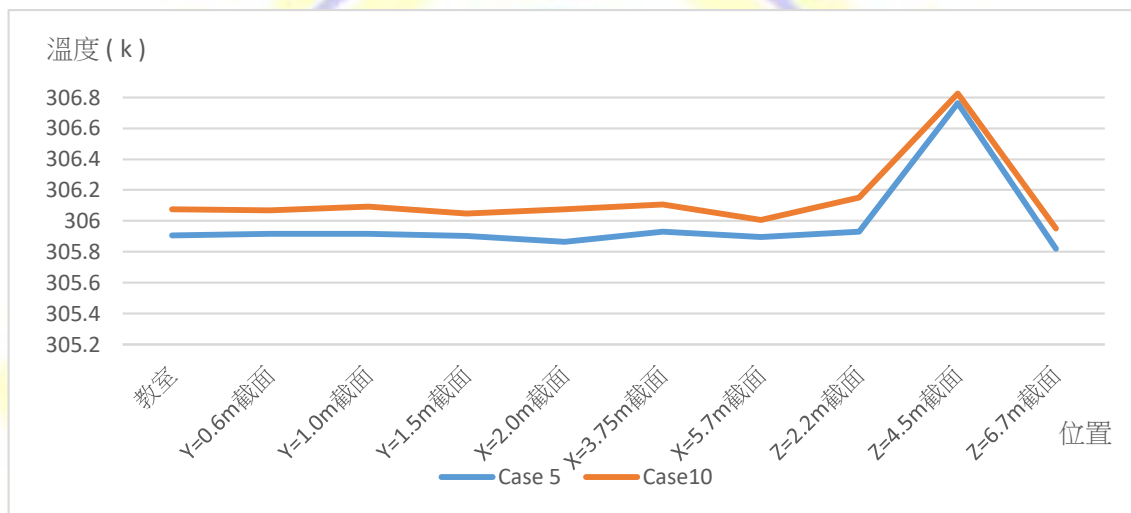


圖 4-27 case 5、case 10 的溫度場數值比較

## 4-3 吊扇配置對室內氣流環境、溫度分佈之影響

### 4-3-1 教室內風速舒適性評估

依據圖 4-12 各案例之 CFD 數值解析之不同 Y 截面速度場結果(a)case1~case 5 可以發現，氣流流速為 case 5 > case 4 > case 2 > case 3；而圖(b)case 6~ case 10 可以發現，氣流流速為 case 10 > case 9 > case 7 > case 8。

綜合上述分析歸納出：不管是開啟上氣窗與採光窗或是只開啟採光窗的狀態下，吊扇全部開啟影響教室內氣流環境最大，再來是開啟對角吊扇，接著是開啟前面兩吊扇，最後才是開啟窗戶旁邊的兩吊扇。

依據第二章的表 2-2 不同風速對人體溫熱舒適感受程度而作成表 4-2 室內風速舒適性評估基準值，分別是：0~0.3m/s 因為不易察覺所以舒適性為劣、0.3~0.5m/s 因為使人愉快，不影響工作所以舒適性為優、0.5~1.0m/s 因為使人一般愉快，但需提防薄紙被吹散所以舒適性為可、1.0~1.5m/s 因為稍有風擊及令人討厭之吹襲所以舒適性為劣。

將 case1~10 的教室平均速度數據轉化成圖 4-28 風速舒適性比較圖來做評估。case1、6 因為沒有開啟任何的吊扇所以其風速低於 0.3m/s，因此平均風速舒適性為劣，而 case 2、3、7、8、9 因為有開啟吊扇平均風速為 0.3~0.5m/s，因此平均風速舒適性為優，而 case 4、5、10 因為有開啟吊扇平均風速為 0.5~1.0m/s，因此平均風速舒適性為可。搭配吊扇的平均風速都小於 1m/s，對人體不會造成風擊，產生不舒適的感覺。

表 4-2 室內風速舒適性評估基準值

風速	0~0.3m/s	0.3m/s~0.5m/s	0.5~1.0m/s	1.0~1.5m/s
舒適性	劣	優	可	劣

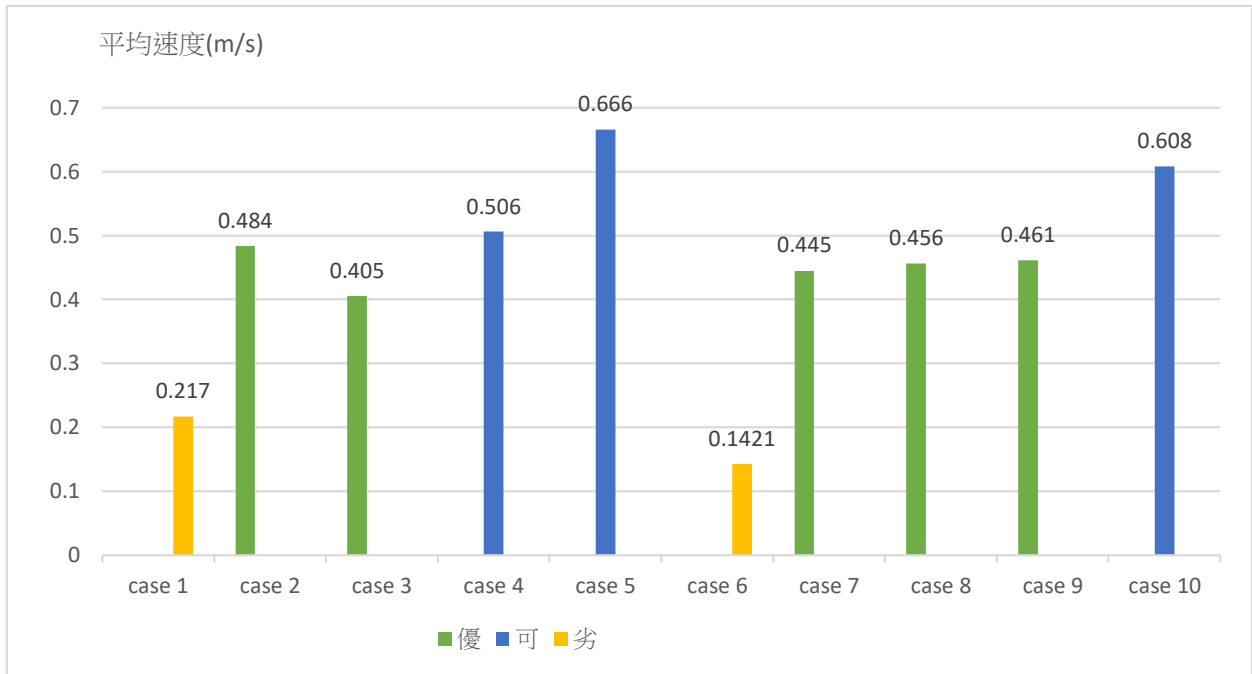


圖 4-28 風速舒適性比較圖

#### 4-3-2 教室內溫度舒適性評估

依據圖 4-20 各案例之 CFD 數值解析之不同 Y 截面之溫度曲線圖(a)case 1 ~ case 5 可以發現，溫度高低變化為:case 5 < case 2 < case 4 < case 3 < case 1；而圖(b)case 6 ~ case 10 可以發現，溫度高低變化為: case 10 < case 7 < case 9 < case 8 < case 6。

綜合上述分析歸納出:不管窗戶是開啟上氣窗與採光窗或是只開啟採光窗，都是吊扇全部開啟影響教室內溫度分布最大，再來是開啟前面兩吊扇，接著是開啟對角兩吊扇，最後才是開啟窗戶旁邊的兩吊扇。

#### 4-3-3 平均溫度相對百分比

本研究以外氣溫度 305.15K 作為人體溫熱舒適感受比較基準，比較自然通風與搭配吊扇間的平均溫度相對百分比。如圖 4-29 開啟上氣窗和採光窗的教室平均溫度長條圖所示: case 2 教室平均溫度 305.979k, 下降 0.165k, 相當於降低 16.5%; case 3 教室平均溫度 306.007k, 下降 0.137k, 相當於降低 13.7%; case 4 教室平均溫度 305.987k, 下降 0.157k, 相當於降低 15.7%; case 5 教室平均溫度 305.906k, 下降 0.238k, 相當於降低 23.9%。

圖 4-30 只開啟採光窗的教室平均溫度長條圖所示:case 7 教室平均溫度 306.17k, 下降 0.131k, 相當於降低 11.3%; case 8 教室平均溫度 306.255 k, 下降 0.046k, 相當於降低 4%; case 9 教室平均溫度 306.169k, 下降 0.132k, 相當於降低 11.5%; case 10 教室平均溫度 306.076k, 下降 0.225k, 相當於降低 19.5%。

綜合上述分析歸納:不管窗戶是開啟上氣窗與採光窗或是只開啟採光窗, 四座吊扇全部開啟影響教室內溫度分佈最大, 再來是開啟前面兩吊扇, 接著是開啟對角兩吊扇, 最後才是開啟窗戶旁邊的兩吊扇。

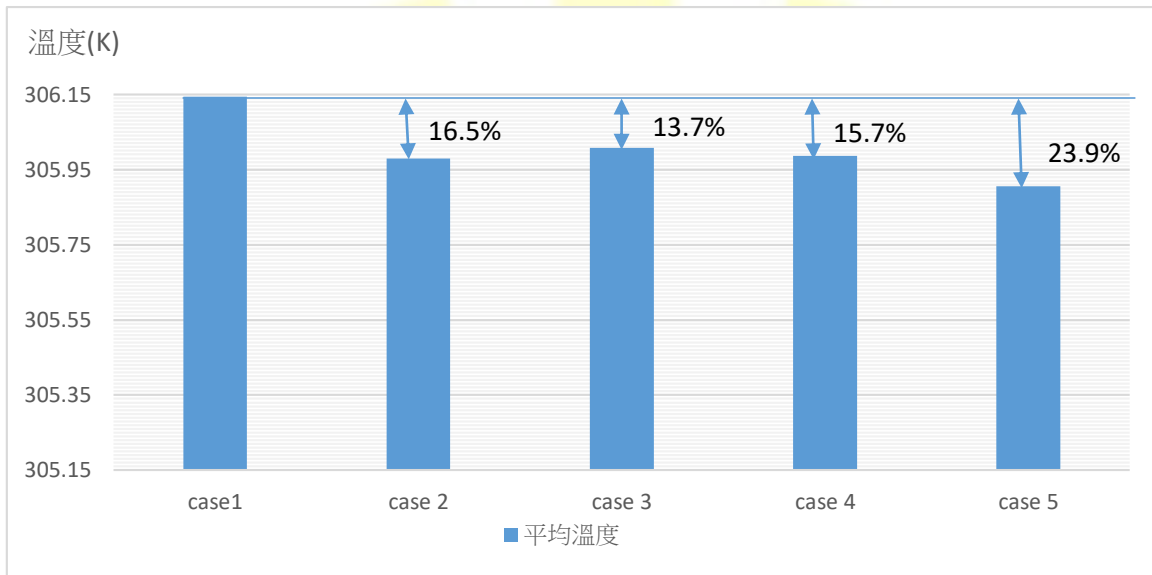


圖 4-29 開啟上氣窗和採光窗的教室平均溫度長條圖

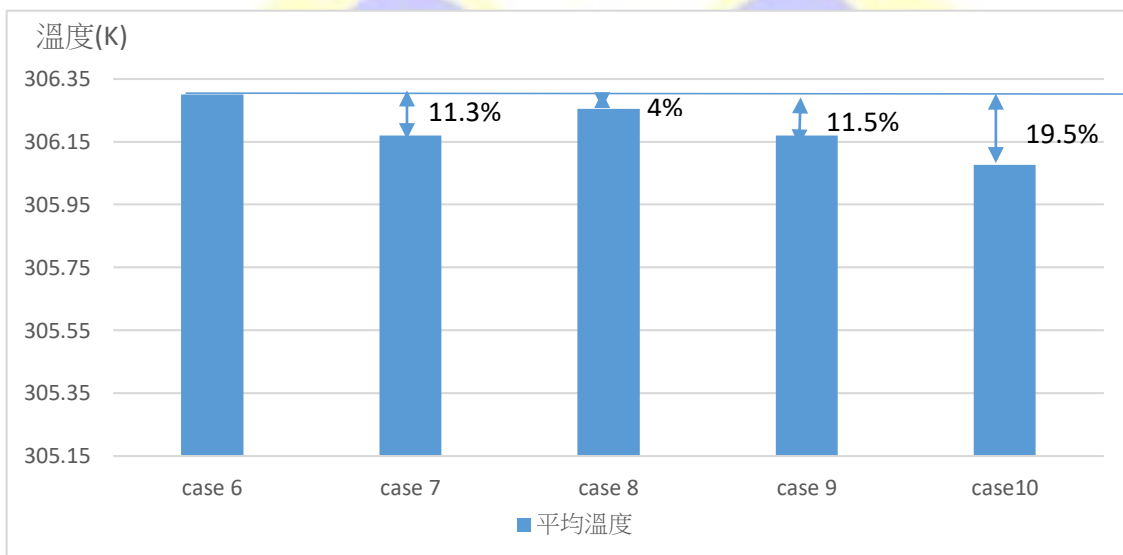


圖 4-30 只開啟採光窗的教室平均溫度長條圖



## 第五章 結論與建議

### 5-1 結論

本研究以國小普通教室為研究對象，探討不同開窗方式搭配吊扇使用對自然通風效益的影響。假設外界溫度 32 度時，開啟上氣窗與採光窗或只開啟採光窗，並搭配自然通風、開啟左右兩座吊扇、開啟靠窗邊兩座吊扇、開啟對角兩座吊扇以及四座吊扇全部開啟，運用 CFD 電腦模擬數值解析為研究工具，數值解析方式進行教室內氣流場與溫度場之模擬。

本研究結果可歸納以下結論：

#### 一、自然通風與搭配吊扇使用的室內流場與溫度場的分布狀況

自然通風下，教室內的流場分布平均，大致上流速都保持在 0.3m/s 以下，屬於無感氣流狀態；而搭配吊扇使用後的教室流場擾動狀況則比較明顯，但整間教室的平均氣流速度也都能保持在 1m/s 以下，不會因為風速過快而造成風擊，因此上課的同學不會感到不舒服。

自然通風下，教室內的溫度場分布平均，大致上溫度都保持在 306k 左右；而搭配吊扇使用後的教室溫度場也能下降 4%~24%，如果再搭配速度場的影響，體感溫度會因此下降，而提高學生在教室上課的舒適度。

#### 二、上氣窗對教室內自然通風效果之影響結果

當開啟上氣窗與採光窗時，教室內的溫度會低於只開啟採光窗的教室，而且教室內的空氣流動速度也會比只開採光窗的教室還要快，因此教室內的上氣窗開不開啟，對於室內通風效益是有影響的。

#### 三、吊扇配置對教室內自然通風效果之影響結果

不管窗戶是開啟上氣窗與採光窗或是只開啟採光窗，吊扇的配置是能有效的改善教室的通風效果。其中，四座吊扇全部開啟影響教室內溫度分佈與氣流場最大，再來是開啟前面兩吊扇，或是開啟對角兩吊扇，最後才是開啟窗戶旁邊的兩吊扇。

## 5-2 建議與未來方向

此研究之假設較為單純，教室實際現場狀況會較為複雜許多，任何一個變因都可能造成不同的結果，因此建議往後的研究者可以加入其他的變項，例如：燈具發熱源、拉式開窗、外部遮陽建築……等不同的研究，進而探討其對教室內自然通風效益的影響。期藉此研究能提供其結果可作為將來學校重新設計時的考量依據，也可作為探討普通教室節能省電的重要參考依據。



## 參考文獻

- [1] 唐德超，石洪(2011)。建築物自然通風節能的理論與運用。2011 海峽兩岸氣候變遷與能源永續發展論壇。
- [2] 王錦堂(1990)。建築應用物理學。臺北市:台隆書店。
- [3] 蘇慧貞(2007)。室內空氣污染預防與 IAQ 管理-專業版。行政院勞工委員會。
- [4] 賴榮平(1980)。台灣地區建築通風換氣問題之探討。臺北市:建築師雜誌。
- [5] 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。國立成功大學建築研究所碩士論文，臺南市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/8628s5>
- [6] 陳鵬宇(1996)。住宅單元空間自然通風效果之研究-以集合住宅臥室空間為例。國立成功大學建築研究所碩士論文，臺南市。
- [7] 徐偉森(1997)。住宅臥室空間自然通風效果之研究-濃度衰減法實驗與數值模擬之解析。國立成功大學建築研究所碩士論文，臺南市。
- [8] 林宏駿(2015)。以數值模擬評估小學體育館不同開窗模式之自然通風效益研究。樹德科技大學建築與室內設計研究所碩士論文，高雄市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/bre2qe>
- [9] 翁國揚(2001)。開口部設計對室內流場之影響-以國民小學教室單元為例。國立台北科技大學建築與都市設計研究所碩士論文，臺北市。
- [10] 楊武泰(2005)國民中小學普通教室氣流環境之研究-以座向、走廊、遮陽、開窗與護欄模式為變因。淡江大學建築研究所碩士論文，新北市。
- [11] 吳印浴(2007)。混合通風系統對室內通風效益影響之研究-以雙層屋頂搭配排風扇之教室單元為例。國立成功大學建築研究所碩士論文，臺南市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/5x7c6w>
- [12] 陳玟秀(2008)。下氣窗對小學普通教室熱舒適性之改善策略模擬研究。國立台北科技大學建築與都市設計研究所碩士論文，臺北市。取自

<https://hdl.handle.net/11296/x45wkf>

[13] 李政隆譯(1982)。學校教育設施與環境的計畫。臺北市:五南。

[14] 蔡尤溪、林振源、黃正光(2017)。冷凍與空調。臺北市:高立圖書。

