



# 結合多空間氣流模型與感染傳輸模型預測室內空間 環境氣懸微粒之感染風險

林俊杰<sup>1</sup> 喻新<sup>2\*</sup>

1. 國立宜蘭大學土木工程學系碩士班研究生

2. 國立宜蘭大學土木工程學系教授

## 摘要

世界上氣懸感染疾病案例不斷增加，且致死率有變高趨勢。為了能有效控制氣懸感染疾病，有學者利用 Well-Riley 感染傳輸模型結合計算流體動力學預測氣懸感染風險，但計算流體動力學不易進行長時間及多空間之污染物濃度分析與易感者吸入劑量分析，有文獻建議使用多空間氣流模型進行與感染傳輸模型結合進行感染風險評估。本文使用二氧化碳為污染物指標，實測研究室與教室的二氧化碳濃度，並以多空間氣流模型 CONTAM 進行濃度模擬，進而探討 CONTAM 結合感染傳輸模型預測感染風險之可行性，實驗結果得出模擬與實際量測濃度具強烈相關，表示 CONTAM 進行濃度模擬有其準確性。再利用感染傳輸模型進行分析結果得出感染機率在研究室與教室分別為 0.24%-0.26% 與 0.041%-0.042%，預測感染人數分別為 1.30-1.31 人與 0.83-0.85 人。

**關鍵字：**Wells-Riley、CONTAM、感染風險、二氧化碳

\*通訊作者 E-mail：yuhsin@niu.edu.tw



# **Prediction of airborne infection risk in indoor space by integrated multi-zone airflow and infection transmission modeling**

**Chun-Chieh Lin<sup>1</sup>, Hsin Yu<sup>2\*</sup>**

- 1. Graduate Student, Department of Civil Engineering, National Ilan University.**
- 2. Professor, Department of Civil Engineering, National Ilan University**

## **ABSTRACT**

The case of airborne infection diseases and the mortality increased continually in the world. In order to control the airborne infection transmission, the integrated model combined computer fluid dynamics (CFD) and Wells-Riley equation to predict the risk of airborne infection is conducted. But the CFD method is difficult to analysis multi-zone space during a long time and the inhaled dose of susceptible persons. The integrated model combined the multi-zone airflow model and the Wells-Riley equation to predict the airborne infection risk is suggested by literature. The CO<sub>2</sub> is used to the maker in this study. The CO<sub>2</sub> concentration of office and classroom is measured and is simulated by CONTAM. The integrated model combined multi-zone airflow model and the Wells-Riley equation is derived. The results indicate that experimented data and simulate data and have the high correlation. The predicted infection probability of office and classroom is 0.24% to 0.26% and 0.041% and 0.042% separately by Wells-Riley infection equation. The basic reproductive number of office and classroom is 1.30 to 1.31 and 0.83 to 0.85 separately.

**Keywords:** Wells-Riley, CONTAM, infection risk, carbon dioxide.

**\*Corresponding author E-mail: [yuhsin@niu.edu.tw](mailto:yuhsin@niu.edu.tw)**

## 一、前言

### 1-1 研究背景

近年來，氣懸微粒疾病已經在全球造成許多死亡案例，例如：2003 年嚴重急性呼吸道症候群(SARS)疫情爆發造成東南亞地區病患及醫療人員死亡，並造成社會恐慌；2004 年全世界有高達 8900 萬肺結核(TB)病例且 1.7 萬人死於肺結核，以及流行性感冒(H1N1)等(Qian et al., 2009)。在現代社會中，人類活動範圍經常在室內公共環境中，當室內公共環境發生嚴重氣懸微粒傳染疾病，例如：辦公室環境下傳染感冒病毒、飛機上流感傳播、醫院中肺結核爆發，容易造成群聚感染，嚴重感染時，可能會造成大量人員死亡且將花費大量的醫療資源及社會資源。因此，為了能有效控制氣懸感染疾病潛在影響並降低疾病感染風險，我們應建立有效之感染風險模型，利用模型的建立以有效評估在不同環境狀況下，氣懸微粒傳染疾病之途徑並探討減少感染率與疫情爆發之方法。

### 1-2 文獻回顧

為了評估氣懸感染疾病風險，Wells et al. (1955)首先提出以量子(quantam)做為劑量單位理論之概念，量子為一個假想值，並非實際物理單位，它被定義為造成易感者感染之劑量單位，易感者造成感染所需感染劑量通常是由流行病學文獻所得出之經驗值，且 Wells 認為易感者感染情形為卜瓦松分佈。Riley et al. (1978)結合 Wells 之理論並發展出 Wells-Riley 方程式來估計郊區小學麻疹疫情爆發之感染風險，但對此方程式具有兩個限制條件：(1)室內空氣為均勻混合狀態(2)室內空氣為穩態。第一個假設表示在同一個室內空間中，粒子感染機率均為相同；第二個假設表示室內粒子濃度與室外空氣供給率為穩定。後續學者多依照 Wells-Riley 感染傳輸模型所提出的概念，加入其他影響感染風險參數改變而將原本方程式變形進行感染風險分析 Sze To and Chao (2010)；Pantelic and Tham (2012)。Rudnick and Milton (2003)利用二氧化碳(CO<sub>2</sub>)為生物暴露指標，以吸入由感染者呼出之污染物來評估感染風險機率並擴展出非穩態 Wells-Riley 方程式。然而，非穩態之 Wells-Riley 仍有空氣均勻混合之限制。

### 1-3 研究目的

為了解決空氣中均勻混合的問題，已經有學者提出可利用計算流體動力學模型(CFD computational fluid dynamics)或多空間氣流模型來解決前述之限制條件。Qian et al. (2009) 利用 CFD 並結合 Wells-Riley 感染傳輸模型預測醫院內病原體之濃度變化並建立醫學院學生感染 SARS 之風險分佈情形(圖 1)，Zhu et al. (2012)結合 CFD 與 Wells-Riley 感染傳輸模型分析公車內流感感染風險分佈。Noakes and Sleight (2009)建立隨機 Wells-Riley 風險模型並結合多空間通風模型來解釋在感染者附近之易感者感染機率為相同，並假設空間中空氣為均勻混合狀態。雖然學者提出利用 CFD 結合感染傳輸模型可以模擬出氣懸傳染濃度傳播之空間分佈並預測感染風險，但在非穩態情況下，利用 CFD 模型進行長時間暴露及大範圍不同空間之模型，相較於多空間氣流模型則需要耗費更多時間與精力，且無法估算易感者暴露在空間中之累積劑量(dose)。所以我們可利用多空間氣流模型(CONTAM)來預測感染風險，模擬之結果再結合 Wells-Riley 感染傳輸模型可得出空間中其感染風險分佈情形。

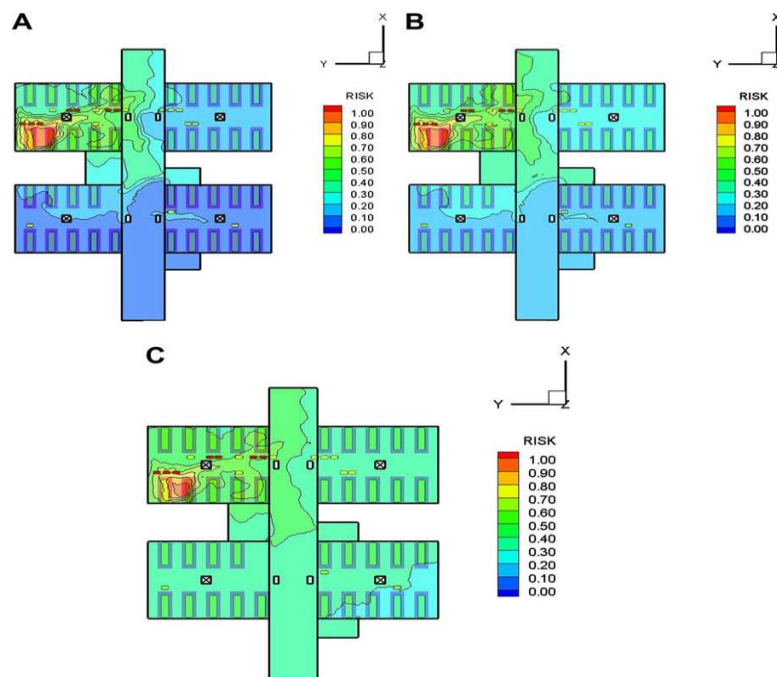


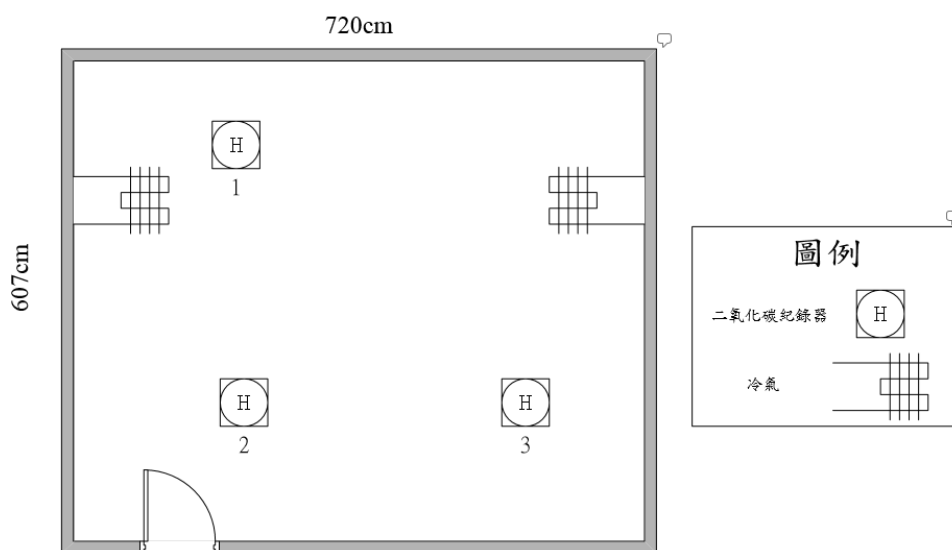
圖 1. 利用 CFD 與感染傳輸模型預測醫學院學生感染 SARS 之風險分佈 (Qian et al., 2009)

## 二、研究方法

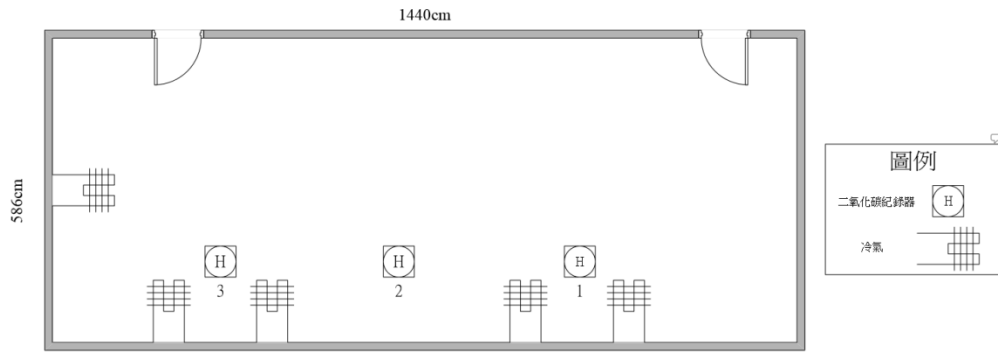
本研究是以二氧化碳作為污染物指標，並利用二氧化碳紀錄器紀錄室內實際二氧化碳濃度變化。本模擬基本假設室內空間空氣為均勻混合，並記錄空間中所有建築尺寸與通風設施參數(冷氣通風量)及室內人員出入情形後，再以多空間氣流軟體(CONTAM)模擬室內二氧化碳濃度，並與實際室內二氧化碳濃度進行比較，以了解多空間氣流軟體模擬單空間中污染物濃度傳輸之準確性，再利用感染模型預測其感染風險及感染人數。

### 2-1 實驗場所

本實驗以國立宜蘭大學土木工程系工學院大樓 203 教室及營建管理研究室為實驗地點，將三座二氧化碳紀錄器放置於教室空間及研究室中，記錄器位置與尺寸分別如圖 2(a) 及(b)所示。教室建築尺寸為長 14.4 公尺、寬 5.865 公尺、高 3 公尺；研究室尺寸為長 7.2 公尺、寬 5.95 公尺、高 3 公尺，並利用風速計紀錄冷氣通風量，並以人為觀察方式記錄學生進出教室與研究室之情形，實驗假設全程教室門窗為關閉狀態，忽略開門時之通風量且假設室內空間為均勻混和狀態。



(a)



(b)

圖 2. 教室二氧化碳紀錄器位置與空間尺寸圖(a)營建管理研究室(b)工學院大樓 203

## 2-2 實驗方法

本實驗主要利用二氧化碳紀錄器與資料收集器紀錄室內空間二氧化碳資料，並使用風速計紀錄冷氣通風量，各項實驗儀器廠牌型號與性能如表 1 所示。二氧化碳紀錄器紀錄頻率為每 5 分鐘紀錄一筆資料；風速計記錄頻率為每秒紀錄一筆，時間為 5 分鐘，並以 300 筆資料取其平均值為風速紀錄

表 1. 各項實驗儀器廠牌型號與性能表

儀器名稱	廠牌型號	量測值範圍	精確度	最小量測值
二氧化碳溫溼度紀錄器	TR78Ui, 泰菱有限公司, 台灣	0~9999 ppm ; 0~45°C	±(50ppm+5% of reading) ; ±0.5°C	1 ppm ; 0.1°C
風速計	Models 8380, TSI Inc, USA	42~5250m <sup>3</sup> /h	±3% of reading ±12m <sup>3</sup> /h>85m <sup>3</sup> /h	1 m <sup>3</sup> /h

## 三、模擬方法

### 3-1 多空間氣流模型

CONTAM 為美國國家標準與技術研究院(NIST, National Institute of Standards and Technology)所開發室內空氣品質(IAQ,indoor air quality)模式與氣流分析之多空間氣流軟體。CONTAM 能將空間分佈與通風設施定義為元件，且設定模擬參數，再進行氣流與

壓力、污染物濃度及人體暴露量等結果 Walton and Dols (2013)，圖 3 為利用 CONTAM 進行室內通風與人員暴露污染物模擬之操作畫面。CONTAM 各項模式之說明如下：

- (1) 氣流模擬：因機械通風所造成氣壓差，造成空間中氣體滲入及滲出或在房間與房間流動，與室內外溫差所造成的浮力效應。
- (2) 污染物濃度：污染物藉由氣流傳輸散佈於空間中，且污染物可藉由化學及非化學的轉化，吸附在建築物上、過濾或沉積在建築物表面上。
- (3) 人體暴露：預測人體在污染物空間中之暴露情形，暴露結果可用於分析風險評估。

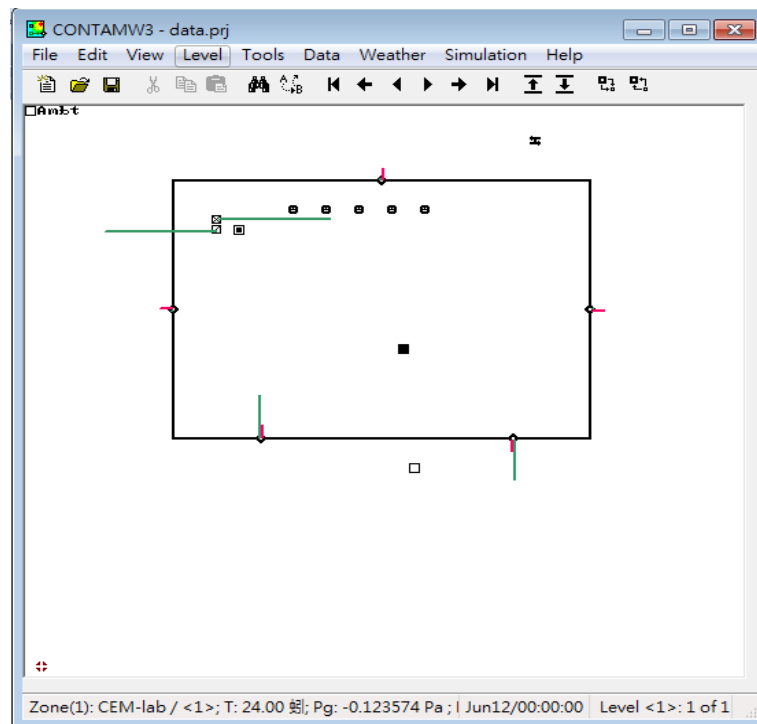


圖 3. 利用 CONTAM 進行室內通風與人員暴露污染物模擬操作畫面

### 3-2 模擬參數

本次研究之多空間氣流模型模擬所使用參數值如表 2 所示，各項數值係數依實際量測結果或文獻資料得到，各項感染疾病產生感染量子數如表 3 所示。

表 2. 實驗參數表

參數項目	位置	數值	單位	資料來源
工學院大樓 203 教室 尺寸	—	253.37	m <sup>3</sup>	實際測量結果
營建管理研究室尺寸	—	131.00	m <sup>3</sup>	實際測量結果
冷氣機通風量	—	90	l/s	風速計測量
建築空間之洩漏量	外牆	5	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	Emmerich et al.,2013
	內牆	6	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	
	門	50	cm <sup>2</sup>	
	天花板	8.68	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	
成人二氧化碳產生率	—	0.3	l/min	Rudnick and Milton,2003
成人呼吸量	—	8	l/min	

表 3. 各項感染疾病產生感染量子數(Azimi and Stephens., 2013)

感染疾病類別	產生量子數(quantam/hr)
一般感冒(Rhinovirus)	1-10
肺結核(Tuberculosis)	1-50
嚴重急性呼吸道症候群(SARS)	10-300
一般流感(Influenza)	15-500
麻疹(Measles)	570-5600

### 3-3 感染傳輸模型

為了預測室內氣懸傳染疾病之感染風險，Riley et al. (1978)提出了 Well-Riley 方程式

(1)：

$$P = \frac{D}{S} = 1 - \exp\left(-\frac{Ipqt}{Q}\right) \quad (1)$$

式中 P 為感染機率(%)。D 為感染者人數(人)；S 為易感染者人數(人)；I 為已感染者數量(人)；q 為量子粒子產生率(quantam/h)；p 為未感染者呼吸量(m<sup>3</sup>/h)；Q 為室內通風量(m<sup>3</sup>/h)

### 3-4 非穩態感染傳輸模型

假設室內二氧化碳主要由人體產生，並無其他產生途徑，且二氧化碳須符合質量守



恆定律並室內空氣為均勻混合狀態時，可得到式(2)：

$$C_a V_e = (C - C_0)V \quad (2)$$

式中  $C_a$  為室內人員呼吸產生二氧化碳濃度； $V_e$  為室內人員呼吸空氣體積量(m<sup>3</sup>)； $C$  為室內二氧化碳濃度； $C_0$  為室外二氧化碳濃度； $V$  為室內空間體積(m<sup>3</sup>)

美國冷凍空調工程學會 ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers )對人體代謝程度與二氧化碳產生量關係如圖 4 所示。實驗假設學生在低耗氧下(如辦公室業務)，二氧化碳產生量為 0.30L/min 與呼吸量為 8.0L/min，因此得到  $C_a=0.038$ ，室中  $C_n$  為感染者呼出所增加至室內二氧化碳濃度。利用公式(2)，可以得到再呼吸率  $f$  為式(3)：

$$f = \frac{V_e}{V} = \frac{C - C_0}{C_a} = \frac{C_n}{C_a} \quad (3)$$

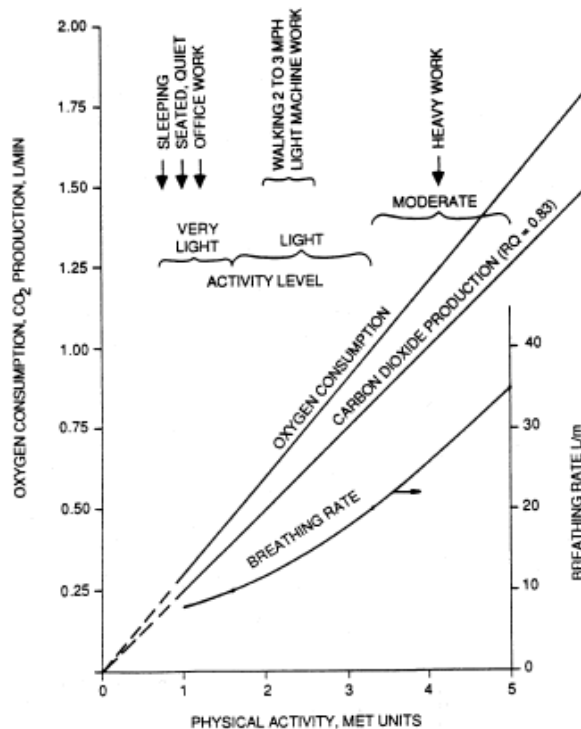


圖 4. 人體代謝與二氧化碳產生量關係圖(ASHRAE 62-1999)

式中  $\frac{q}{p}$  為感染者呼出之粒子濃度， $\frac{fI}{n}$  為感染者呼出空氣體積，室內粒子濃度(N)可表

示為式(4)：

$$N = \frac{f\bar{q}}{np} \quad (4)$$

式中  $n$  為室內人員總數，在非穩態情況，在暴露時間中平均室內粒子濃度( $\bar{N}$ )可由平均再呼吸率( $\bar{f}$ )，

$$\bar{N} = \frac{\bar{f}\bar{q}}{np} \quad (5)$$

根據式 5，其平均感染機率可以表示為式(6)

$$P = 1 - e^{-p\bar{N}t} = 1 - \exp\left(-\frac{\bar{f}\bar{q}t}{n}\right) \quad (6)$$

式(6)可應用於空氣通風量隨著時間變化而改變之情況，穩態及非穩態均適用。

### 3-5 基本再生數(R0)

當室內總數為  $n$ ，感染者人數  $I$  為 1 人，其餘人數為易感者  $S$ ，基本再生數( $R_0$ )為感染發生後之感染人數，在流行病學中， $R_0$  為感染是否散佈之指標。當  $R_0 > 1$ ，表示感染會繼續蔓延。於室內環境感染之基本再生數，可表示為式(7)

$$R_0 = (n - 1) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\bar{f}\bar{q}t}{n}\right) \right] \quad (7)$$

## 四、結果與討論

本研究探討利用實際量測二氧化碳濃度，並用 CONTAM 進行二氧化碳濃度模擬，並比較模擬結果是否相符，再利用感染傳輸模型進行感染分析模擬，以預測感染風險。

### 4-1 工學院大樓 203 教室二氧化碳濃度量測與模擬分析結果

教室二氧化碳濃度分析結果如圖 5 所示。室內有五台冷氣在運轉，當固定冷氣風量大小時，總通風量約為 540L/s。在上午 9 點 25 分時，室內人數為 21 人，經過 1 小時後

下課，室內人數剩下 13 人，10 點 32 分中堂下課結束，於 11 點 55 分下課。在上課時段，二號二氧化碳紀錄器濃度都略比其他高 100-200ppm，其測得二氧化碳濃度最高約為 2700ppm，CONTAM 模擬濃度最高約為 2500ppm；若將上午 9 點 25 分至 11 點 55 分所測得 151 筆資料與 CONTAM 模擬作比較，得出相關圖形如圖 6 所示，結果顯示決定係數  $R^2$  為 0.98，模擬與實際量測有高度相關性，表示 CONTAM 模擬污染物濃度變化有其準確性，結果如圖 5、圖 6 所示。

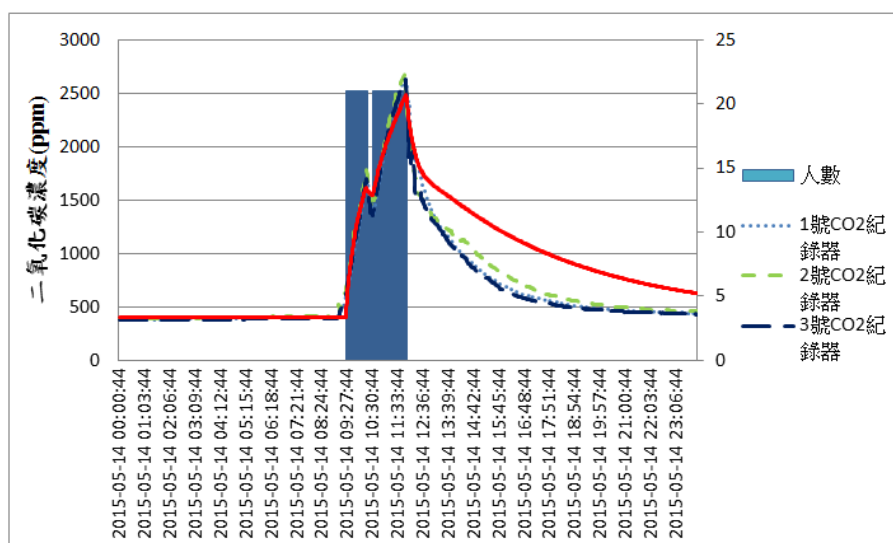


圖 5. 工學院大樓 203 教室實測與 CONTAM 模擬二氧化碳濃度圖(2015/5/14)

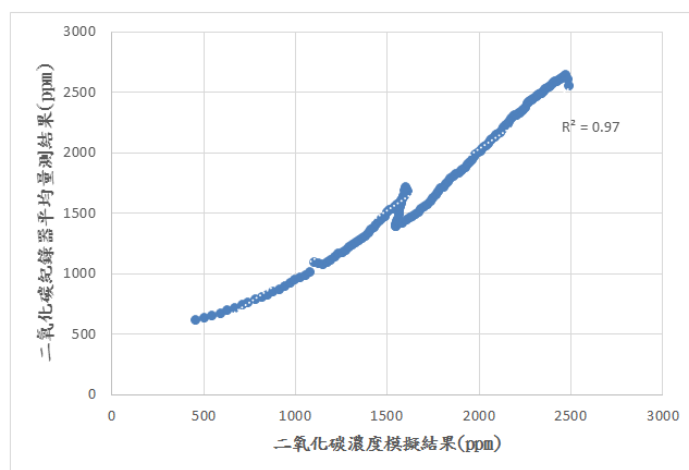


圖 6. 工學院大樓 203 教室二氧化碳濃度實測與 CONTAM 模擬關係圖(2015/5/14)

#### 4-2 營建管理研究室二氧化碳濃度量測與模擬分析結果

營建管理研究室二氧化碳分析結果如圖 7 所示，室內有 2 台冷氣運轉，固定其風量大小，總通風量約為 180L/s，研究室因空間較小，二氧化碳紀錄器濃度約略相同。當室內人數為 6 人時，二氧化碳紀錄器最高濃度約為 1319PPM；CONTAM 模擬二氧化碳最高濃度為 1379PPM，將早上 9 點至晚上 12 點間所測得 181 筆資料與 CONTAM 模擬作比較，可得相關圖形如圖 8，結果顯示決定係數為 0.99，模擬與實際量測為高度相關性，表示 CONTAM 模擬污染物濃度變化有其準確性，結果如圖 7、圖 8 所示。

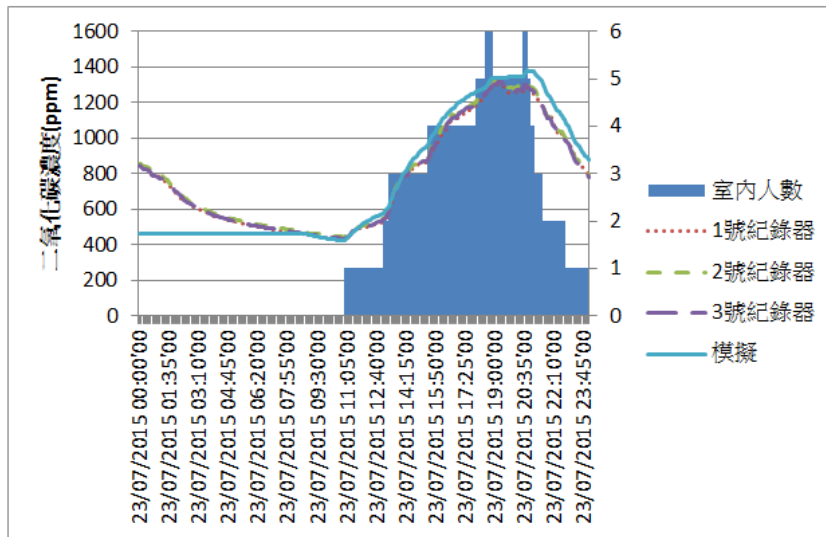


圖 7. 營建管理研究室實測與 CONTAM 模擬二氧化碳濃度圖(2015/7/23)

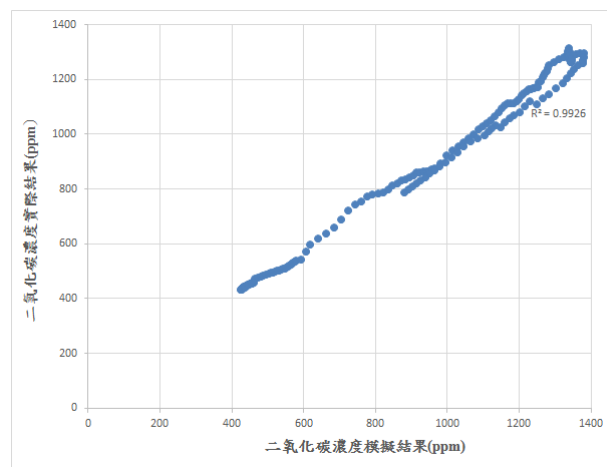


圖 8. 營建管理研究室二氧化碳濃度實測與 CONTAM 模擬關係圖(2015/7/23)

### 4-3 利用非穩態 Wells-Riley 預測感染風險

利用二氧化碳紀錄器實測學生上課情況之二氧化碳濃度，並以 CONTAM 進行濃度模擬，再利用非穩態 Wells-Riley 感染傳輸模型(式 6)預測感染風險。假設感染疾病為一般感冒，感染粒子產生量為  $q=10(\text{quanta})/\text{hr}$ ，曝露時間為上課期間 3 小時，工學院大樓 203 教室感染者人數為 1 人( $I=1$ )，易感者人數為 20 人( $S=20$ )；營建管理研究室感染者為 1 人( $I=1$ )，易感者人數為 5 人( $S=5$ )，曝露時間為 15 小時。感染結果整理如表 5 所示。模擬結果發現研究室空間小且通風不佳，暴露時間亦長，導致室內二氧化碳濃度偏高，感染機率比工學院大樓 203 教室高。

表 5. 感染傳輸模型實際與預測參數及結果

$P=1 - \exp(-\frac{\bar{f}Iqt}{n})$	營建管理研究室 實測	營建管理研究室 模擬	工學院大樓 203 教室實測	工學院大樓 203 教室模擬
感染粒子 $q(\text{quanta})$	10	10	10	10
暴露時間(hr)	15	15	3	3
室內人數 $n(\text{人})$	6	6	21	21
再呼吸率 $\bar{f}$	0.0128	0.0141	0.006051	0.005911
感染者 $I(\text{人})$	1	1	1	1
易感者 $S(\text{人})$	5	5	20	20
感染機率 $P(\%)$	0.240	0.261	0.042	0.041
基本再生數 $R_0(\text{人})$	1.30	1.31	0.85	0.83

## 五、結論與建議

本研究探討利用  $\text{CO}_2$  為污染物指標，探討利用多空間氣流模型 CONTAM 進行濃度模擬分析並結合感染傳輸模型進行預測感染風險的可行性研究。並以國立宜蘭大學工學院 203 教室與營建管理研究室為實驗場所，實際量測室內二氧化碳濃度與 CONTAM 模擬濃度比較，進而探討其模擬準確性。實驗結果整理於下：

- (1) 實際量測與 CONTAM 模擬之二氧化碳濃度位於營建管理研究室與工學院大樓 203 教室相關決定係數分別為 0.99 與 0.97，表示利用 CONTAM 模擬室內二氧化碳濃度有其準確性。

(2) 當利用感染傳輸模型進行假設性感染分析，結果顯示營建管理研究室感染機率約為 0.25；工學院大樓 203 教室感染機率約為 0.04。營建管理研究室基本再生數  $R_0 > 1$ ，表示有感染情況發生；工學院大樓 203 教室因基本再生數  $R_0 < 0$ ，無感染情況發生。

本研究實驗因不可控制因素多，如開門、室內人員短時間進出場所及不可確定因素。且本實驗感染模擬無實際案例可以佐證感染機率準確性，所以建議將實驗場所設於醫院及老人安養院等，能有效控制人員進出時間且有實際感染案例之數據，並可與模擬結果進行比較，以確定模型之正確性，CONTAM 能有效正確模擬室內污染物濃度。目前並無學者使用 CONTAM 並結合氣懸感染模型進行風險評估，希望藉由本研究提供生物環境學者一個新方法，當疾病發生時，能利用多空間氣流模型與氣懸感染模型建立感染風險模型，並預估感染規模與預測感染風險。

### 參考文獻

- ASHRAE 62., 1999, "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality American Society of Heating," *Refrigerating and air-Conditioning Engineers, Inc.*
- Azimi, P., Stephens, B., 2013 "HVAC filtration for controlling infectious airborne disease transmission in indoor environments: Predicting risk reductions and operational costs," *Building and Environment*, Vol. 70, pp. 150-160.
- Emmerich, S.J., Heinzerling, D., Choi, J.I., Persily, A.K., 2013, "Multizone modeling of strategies to reduce the spread of airborne infectious agents in healthcare facilities," *Building and Environment*, Vol. 60, pp. 105-115.
- Noakes, C.J., Sleigh, P. A., 2009, "Mathematical models for assessing the role of airflow on the risk of airborne infection in hospital wards," *J. R. Soc. Interface*, Vol. 6, pp. 791-800
- Pantelic, J., Tham, K.W., 2012, "Assessment of the mixing air delivery system ability to protect occupants from the airborne infectious disease transmission using Wells–Riley approach," *HVAC&R Research*, Vol. 18, pp. 562-574.
- Qian, H., Li, Y.G., Nielsen, P.V., Huang, X.H., 2009, "Spatial distribution of infection risk of SARS transmission in a hospital ward." *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 1651-1658.

Riley, E.C., Murphy, G., and Riley, R.L., 1978, “airborne spread of measles in a suburban elementary school.” *American journal of epidemiology* Vol. 107, No. 5 by The Johns Hopkins University School of Hygiene and Public Health.

Rudnick, S.N., and Milton, D.K., 2003, “Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration”. *Indoor Air*, Vol. 13, pp. 237-245.

Sze To, G.N., Chao, C.Y.H., 2010, “Review and comparison between the Wells–Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases,” *Indoor Air*, Vol. 20, pp. 2-16.

Walton, G.N., Dols, W.S., 2013, “NISTIR 7251 CONTAM User Guide and Program Documentation,” *NIST*.

Zhu, S.W., Srebric, J., Spengler, J.D., Demokritou, P., 2012, “An advanced numerical model for the assessment of airborne transmission of influenza in bus microenvironments,” *Building and Environment*, Vol.47, pp. 67-75.

