

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

呼吸道傳染病相關之生物氣膠飛沫特性與空調控制技術效能評估-以結核菌為模擬對象

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2320-B-040-021-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：中山醫學大學公共衛生系

計畫主持人：林文海

共同主持人：胡石政，白曠綾

計畫參與人員：張幼珍、蔡清讚、蔡春進

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 31 日

中文摘要

本計畫針對呼吸道傳染病相關之生物氣膠飛沫特性與空調控制技術效能，進行相關理論推導與環境實測，主要研究成果包括模擬飛沫液滴自病人口鼻噴出後，飛沫液滴於環境中之蒸發過程與重力沈降之傳輸途徑與受環境溫濕度之影響程度，其次進行模擬飛沫於醫院室內多房間空氣感染之風險評估預測數學模式，並於亂流型手術室進行空氣中生物氣膠的量測與分析。在模擬飛沫粒徑變化時，主要應用氣膠學之蒸發等理論進行運算，在感染預測數學模式之研發部分，本研究主要引用 Well-Riely 方程式，並將之運用至多區多區域、非穩態、以及非均勻分佈等型態，如此可全面而完整地配合醫院各區域的實際狀況，從而使空氣感染的模式更加完備，並提供感控人員相關的設計參數，以降低醫院內空氣感染。為了探討空氣中微生物在亂流型空調環境之無塵手術室手術進行中的變化規率，以及是否對術後感染產生影響。在開刀進行中利用安德森六階採樣器，進行空氣採樣分析統計並在相近空調系統環境條件下之手術室，調查統計分析接受手術病患的病歷來分析追蹤術後感染；最後以套裝軟體 FLUENT 6.1 分析手術時內部環境氣流流場與模擬手術室內部遭受天花板上 HEPA 出風口洩漏粒子時，分別產生於主流區、渦流區、回風口區之粒子軌跡。理論推導結果發現，飛沫粒徑對完全蒸發所需時間之影響遠大於溫度對蒸發時間的影響。在愈濕的環境之下，將愈有利於飛沫液滴之沈積於地面上，故可減少空氣中致病毒液之個數濃度。實驗中發現手術室環境菌屬濃度大小關係為：革蘭氏陽性球菌 > 革蘭氏陽性桿菌 > 革蘭氏陰性桿菌。整個完整手術過程中採到之菌落關係為：渦流區最多，回風區次之，主流區之菌落最少。真菌多集中於渦流區。術後感染病患病歷樣本發現之酵母菌、厭氧革蘭氏陽性細菌、葡萄球菌屬、金黃色葡萄球菌等菌種與採樣結果相吻合。在氣流模擬部份研究發現對於 HEPA 洩漏所產生之灰塵粒子或生物氣膠，對本案例之手術室配置而言，因工作桌放至於手術台後方，灰塵粒子會隨著風飄到躺在手術台上方的已切開病患傷口內及已經沾滿血液的手術用刀械上面。此外當假設污染源為手術進行中由醫生手部產生，污染粒子會沿著病人身上往器械桌方向流過，增加感染機率。

關鍵詞：生物氣膠、飛沫、蒸發、氣流模擬分析、環境測定

英文摘要

Droplets containing infectious agents, such as TB would be with high health risk for people, especially for the clinical personnel. Base on the rules of occupational hygienists-recognition, evaluation, and control, the characteristics of droplets generated from human respiratory system were studied in this research. The modeling and field sampling were conducted to solve the problems. The evaporation model will be applied to simulate the change of the particle size and deposition of the droplet. The CFD method will be applied to simulate the motion of the droplets when they were generated from the patients and could be used to assessment the exposure of the infectious bioaerosols. Bioaerosol characteristics in a typical turbulent type operation room of a general hospital of a medical center was measured and analyzed by the Andersen six-stage sampler. The results show (1) the concentration distributions of bioaerosols were qualitatively similar to those indicated by the so-called three-region model, (2) the types of bioaerosols include GPC, coagulase-negative staphylococci, *Staphylococcus aureus*, GPB, GNB, and fungi, (3) the measured concentrations were related to the sampling locations, the working behavior of the occupant in the operation room, layout of the medical equipment, and airflow patterns.

Keyword: bioaerosol, evaporation, Andersen sampler, droplet, operation room

前言

從西元 2002 年 12 月以來，嚴重呼吸道症候群 (Severe Acute Respiratory Syndrome, SARS) 在亞洲與北美開始傳播擴散以來，許多流行病學研究顯示，飛沫或液滴傳染是主要的傳染途徑之一。而許多來自醫療院所的感染，被懷疑與空調與環境控制不當有關，因此有必要對生物氣膠飛沫特性及空調控制效能評估做進一步之研究與評估。

研究目的

本研究針對飛沫液滴自病人口鼻噴出後，飛沫液滴於環境中之蒸發過程與重力沉降傳輸途徑進行模擬，並探討在不同的相對濕度環境下，飛沫完全蒸發時，各粒徑大小所需時間與沉降行走距離之變化，以進一步提供在控制病毒傳輸途徑及沉降位置之資訊。其次進行模擬飛沫於醫院室內多房間空氣感染之風險評估預測數學模式，並於亂流型手術室進行空氣中生物氣膠的量測與分析，評估醫療院所之空調效能。

理論模式推導

1. 重力沉降過程

微粒之終端速度與微粒粒徑的關係式如下 (Baron and Willeke, 2001; Hinds, 1999)：

$$V_{TS} = \frac{\rho_p d_p^2 g C}{18\mu} \quad (1)$$

其中 V_{TS} 為終端沉降速度 (cm/sec)， d_p 為飛沫粒徑 (cm)， ρ_p 為飛沫密度 (g/cm^3)， g 為重力常數 (cm/sec^2)， C 為滑動校正因子， μ 為黏滯係數 (g/sec-cm)。由於重力沉降機制會隨著飛沫粒徑的平方成正比，故愈大顆的粒徑其終端沉降速度愈快，例如粒徑 $d_p = 100 \mu\text{m}$ ，其終端沉降速度約為 30 cm/sec。

在獲得不同飛沫粒徑下之沉降速度後，飛沫的沉降行走距離 (S) 或最終停留位置將取決於完全蒸發時間之長短，其關係式如下：

$$S = \int V_{TS} dt \quad (2)$$

2. 飛沫蒸發速率

口鼻飛沫中的水分會因為室內空調濕度較低之故，而逐漸蒸發，使得口鼻飛沫粒徑逐漸減小。一般純水液滴於環境中的蒸發速率完全受周圍氣相傳輸速率快慢所限制，並與環境中的相對濕度或飽和比 ($S_R = P_\infty/P_S$) 有關，在計算飛沫的蒸發速率時，可利用微粒的蒸發/凝結機制來求得，同時考量飛沫蒸發時因潛熱 (latent heat) 釋放，造成表面溫度下降，此外其對表面飽和蒸汽壓亦會因此造成影響，故本研究之飛沫蒸發速率計算，將利用以下方程式來求取之 (Hinds, 1999)：

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{4D_v M}{\rho_p d_p R} \left(\frac{P_\infty}{T_\infty} - \frac{P_d}{T_d} \right) \quad (3)$$

其中 D_v 為擴散係數 ($0.24 \text{ cm}^2/\text{sec}$ at 293°K)， M 為水之分子量 (18 g/mole)， R 為理想氣體常數 ($8.31 \times 10^7 \text{ dyn-cm/K-mole}$)， P_∞ 、 T_∞ 分別為周界環境水之蒸汽壓 (erg/cm^3) 與環境溫度 (K)， P_d 與 T_d 則分別為微粒表面上之飽和蒸汽壓與溫度。由於潛熱釋放的影響， T_d 值將小於環境溫度 T_∞ ，並與環境中的溫度和相對濕度或飽和比 (S_R) 有關，潛熱釋放時液滴表面溫度下降值之經驗公式如下 (Hinds 1999)：

$$T_d - T_\infty = \frac{(6.65 + 0.345T_\infty + 0.003T_\infty^2)(S_R - 1)}{1 + (0.082 + 0.00782T_\infty)S_R} \quad (4)$$

經由 (4) 式獲得不同相對濕度下，液滴表面之溫度值後，將可進一步計算出飛沫表面之飽和蒸汽壓值 (P_d)，以評估出飛沫之蒸發速率值。

3. 飛沫傳輸模式

本研究將建立一飛沫傳輸模式，來描述飛沫於揮發過程中因重力沈降所行走之距離，並探討在環境溫度為 293°K 與 298°K (20°C, 25°C)，並在不同相對濕度下 (RH = 40%-100%)，飛沫完全蒸發所需時間與其沈降行走距離之變化，以瞭解病毒之傳輸途徑及最終沈降位置。經彙整上述幾式，飛沫液滴完全蒸發所需時間(t)與沈降行走距離之變化分別為：

$$t = \frac{R\rho_p d_p^2}{8D_v M \left(\frac{P_d}{T_d} - \frac{P_\infty}{T_\infty} \right)} \quad (5)$$

$$S = \int \frac{3 \times 10^5 R\rho_p^2 d_p^3 C}{4\alpha D_v M \left(\frac{P_d}{T_d} - \frac{P_\infty}{T_\infty} \right)} d(d_p) \quad (6)$$

在上式 (6) 中增加了一個調和參數 α (accommodation coefficient)，調和參數之物理意義為物質揮發後其氣體分子與固體 (或液體) 表面達平衡時之跳脫分率 (Friedlander, 2000)，而不同之物質其調和參數值即有所不同，如純水一般使用 $\alpha = 1.0$ ，而唾液揮發之 α 值必然小於 1.0，但是目前文獻中尚缺乏該值相關資料，因此後續進行實驗時，可以依照實驗結果進行理論之修正，以求得 α 值，並可因此獲得較準確之理論預測。

4. Well-Riely 方程式

透過醫院空調系統而傳播的院內空氣感染的案例不勝枚舉 (Fisk and Rosenfeld, 1997; Milton *et al.*, 2000)，美國的 National Institute for Occupational Safety and Health (1998) 曾資助多項計畫以發展院內空氣感染預測模式，期能掌握建築物空調系統各項參數對院內空氣感染之影響，而於 1978 年由 Riely *et al.* 提出的 Well-Riely 方程式 (1955 年首見於 Wells 於 Harvard University Press 發表的文章) 是最常被引用的分析預測模式。

此方程式如下：

$$P = \frac{D}{S} = 1 - \exp\left(\frac{-bqt}{Qo_y}\right) \quad (7)$$

其中 P = 感染率 (%)

D = 被感染之案例數 (即新感染例)

S = 暴露於感染環境下之總人數

b = 每個人之呼吸量 (m^3/h)

q = 每位感染源感染強度 (quanta/h)

t = 暴露於感染風險環境下之時間 (h)

Qo_y = 外氣的引入量 (m^3/h)

此方式之基本限制為：(1)室內氣流型態為穩態且均勻；(2)恆定的外氣量；(3)僅適用於單室 (即個別房間的預測)。

針對 Wells-Riely 方程式，Fennelly and Nardell (1998) 加入呼吸防護器的影響參數 R ，使得方程式成為 $P = \frac{D}{S} = 1 - \exp\left(\frac{-bqtR}{Qo_y}\right)$ ，從而使呼吸防護器對感染率的影響定量化。

在 Wells-Riely 方程式中最常令人誤解的參數為 q (感染源強度)，透過各種調查及個案研究，幾個感染症的 q 值被定量化，見表 1 所示。

綜合觀之，到目前為止之文獻都以 Wells-Riley 公式為基本，應用於不同的病原體及單一區域之建築而已，未將不穩定及不均勻外氣分佈這兩項實際工程控制 (engineering control) 的因素考慮進去。

表 1 各種病原體之 q 值

病原體名稱	q 值	文獻
Rhinovirus 16	1~10 1/h	Riley and Nardell,1989 Meschievifz <i>et al.</i> ,1984 Rudnick and Milton, 2003
Measles	570 1/h	Riley <i>et al.</i> ,1978
Influenza	79~128 1/h	Rudnick and Milton, 2003
	15~77 1/h	Riley <i>et al.</i> , 1978
Bronchoscopic procedure of an infectious TB patient	250 1/h	Catanzaro, 1982
Patient with active pulmonary TB	13 1/h	Fennelly and Nardell,1998
A person exposed to a dilute or low-concentration of TB aerosol	1.25 1/h	Rilley <i>et al.</i> ,1962

而對於多房間的空調環境，例如醫院的病房，以及對於急診室等人數變化較大的場所，其空氣傳染的模式就是典型的不穩定及不均勻外氣分佈的情況，此種情況並無任何文獻記載。

關於多房間 (multi-zone) 的外氣(outdoor air, OA) 控制，美國冷凍空調工程學會 ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers) 及美國標準局 ANSI (American National Standard Institute) 所共同出版的 ANSI/ASHRAE Standard 62-2001, “Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality” (2001) 以下列方程式規範具有循環回風再利用的 OA 的控制空調策略：

$$Y = \frac{X}{1 - X - F} \quad (8)$$

其中 $Y = \frac{Q_{o_y}}{Q_{s_n}}$ = 循環回風下，外氣流率和主風管送風流率之比值; Q_{o_y} =考慮回風情況下之

外氣流率; $Q_{s_n} = \sum_{i=1}^n Q_{s_i}$ = 總送風流率; Q_{s_i} = 送至個別區域 i 的一次送風流率;

$X = \frac{Q_{o_n}}{Q_{s_n}}$; $Q_{o_n} = \sum_{i=1}^n Q_{o_i}$ = 各區域 i 所需外氣流率之總合; Q_{o_i} = 每個別區域 i 所需之外氣流率;

$F = \frac{Z + K - X}{1 + K}$ = 主送風 (或稱一次送風) 中外氣的比值，以滿足關鍵區 (critical zone)

送風的要求; $Z = \frac{Q_{o_c}}{Q_{s_c}}$; Q_{o_c} = 關鍵區所需的外氣流率; Q_{s_c} = 送至關鍵區域的一次送風

流率; $K = \frac{Q_{p_c}}{Q_{s_c}}$; Q_{p_c} = 關鍵區域回風的流率

研究方法

1. 理論模式推導

飛沫粒徑變化之模擬，主要應用氣膠學之蒸發等理論進行運算。感染預測數學模式之研發，主要針對不穩定的感染源強度 (quanta) 濃度場 N (quanta/m^3) 方程式作積分，解出 N ，對總曝露時間 \bar{t} 取時間平均值，再代入公式(7)即可求得不知不覺情況下的 Wells-Riley 方程式；針對上述所求得之不穩定 Wells-Riley 方程式，再加入換氣效率比 E_v (ventilation efficiency)，即可求得不均勻混合時之 Wells-Riley 方程式；將上述所求之公式配合表 1 的 q 值，結合公式(8)，即可針對具有多區域的空調系統做個別區域的空氣感染機率作預測。

2. 實驗量測之手術室

本研究在台北市某教學醫院新型改建手術室，營運約一年之一般外科手術室進行研

究。其手術室型式為亂流型 (非單向流) 無塵室，清淨等級為 Class 10,000，由天花板向下供風由四個角落回風 (圖 1)。醫護人員進入手術房前需先經過更衣後通過空氣洗塵室 (air shower) 後方可入手術室內部刷手區 (準清淨區)。其房中有兩扇門，一門 (推門) 為醫護人員出入刷手區 (準清淨區) 用途，另門為自動門為通往準清淨區接送病人用途。

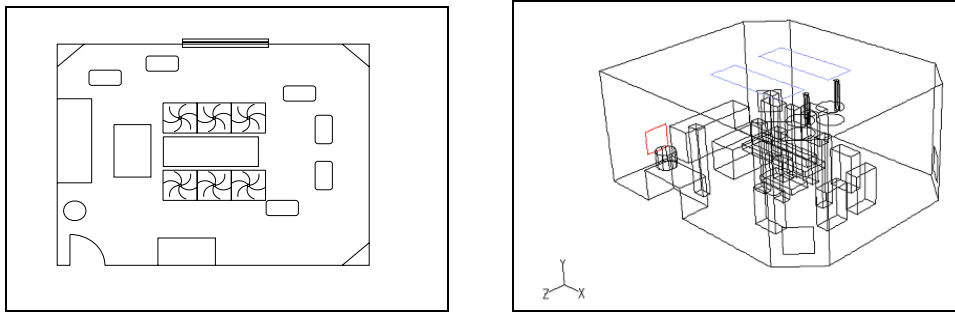


圖 1. 實驗量測之手術室配置圖

3. 空氣微生物採樣及操作

本實驗之細菌培養基為 Sheep Blood Agar (BAP)，真菌為 Sabouraud Dextrose Agar (SDA)，生物氣膠採樣器為安德森 (Andersen) 六階採樣器。本研究實驗前，首先進行空房情況 1 min、5 min、10 min 分別於 3 區 4 點實際預採比對，並對樣本手術室現場進行環境的評估。其結果相似無顯著差異，此外為避免採樣時間過長造成許多微生物的撞擊點處重疊，產生較大的誤差，以及採樣時間太短又採不到菌之困擾；且在手術進行中醫護人員不希望我們進出頻繁及停留時間太久，造成對手術中環境污染及噪音所引起之干擾，故與醫護人員協調後採行 1 min 最短時間進行實驗。細菌採樣每隔 1 小時採樣一次，上午七點為第一次採樣，到上午十一點共採樣五次樣本；真菌採樣每隔 2 小時採樣一次。採樣後鑑定空氣微生物測定培養分析，分別將細菌標本置於 37°C 培養兩天，真菌標本置於 30°C 培養至少四天，然後將培養數天之樣品取出，並在每一個樣品做菌落數計數。

結果與結論

1. 飛沫蒸發時間與沈降距離

圖 2 為飛沫在 50% 相對濕度，溫度分別為 20°C 及 25°C 下，飛沫粒徑與其完全蒸發所需時間之關係圖。由圖可知當飛沫粒徑越大時，溫度對蒸發時間之影響將增大，然而在 5°C 之溫度差異下，其對蒸發時間之影響並不算大，例如在 100 μm 時，當溫度為 20°C 時，其需要約 16 sec 來達到完全蒸發，而在 25°C 則需約 15 sec 達到完全蒸發。而當粒徑變小時，其飛沫完全蒸發時間迅速下降，在飛沫粒徑 10 μm 以下之完全蒸發時間僅需不到 1 sec，因此飛沫粒徑對完全蒸發所需時間之影響遠大於溫度對蒸發時間的影響。

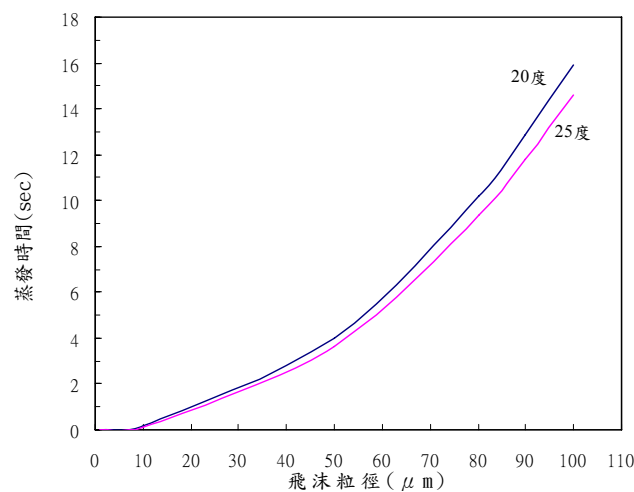


圖 2. 飛沫在 RH=50% 時完全蒸發所需之時間

圖 3 則是在 50%RH 下飛沫粒徑受到蒸發作用所導致之粒徑變化與其沈降距離之關係圖。由圖可知，當口鼻飛沫粒徑小於 10 μm 時，其幾乎在沒有任何沈降距離時即完全蒸發，例如 10 μm 之飛沫在完全蒸發前僅沈降約 0.02 公分，故其幾乎維持在原有之水平高度。因此當飛沫蒸發後，將只有致病細菌或病毒會存在於空氣中，舉 SARS 之冠狀病毒 (corona virus) 為例，其直徑僅 80-140 nm，厚度 20-40 nm (Ksiazek, 2003)，因此預期其若是藉由較小粒徑之飛沫噴出，則在飛沫蒸發後，將以病毒之原生狀態漂浮於空氣中直到其死亡，或是被換氣氣流攜帶至其他區域。而細菌大小則多在微米 (μm) 尺寸等級，因此其可會保有一定之沈降速度，但若是換氣速度過慢，則仍有機會可被氣流攜帶至其他區域。但是相對的，當飛沫粒徑遠大於 90 μm 時，其沈降距離將可以達 150 cm 以上，因此致病菌或病毒應可沈降至地面，不至於漂浮在空氣中。

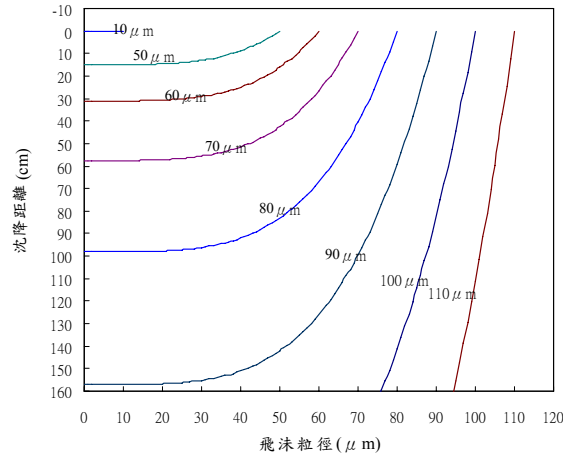


圖 3. 飛沫在 RH=50%、20°C 時粒徑變化與沈降距離之關係圖

2. 相對濕度之影響

藉由相對濕度之控制，應可以減緩飛沫之蒸發速率，並拉長飛沫之沈降距離，使飛沫更易沈降至地面，而減少致病菌與病毒傳送至其他區域之機率。圖 4 即為飛沫在 20°C 環境，不同相對濕度控制下 (40~70%) 之完全蒸發時間。舉例而言，同樣是 50 μm 之飛沫粒徑，其在相對濕度為 40% 時之完全蒸發時間只需 3.5 秒；相對的，如果相對濕度可以控制在 70% 時，則 50 μm 之飛沫完全蒸發時間則為 6.7 秒，其約為 40%RH 下之完全蒸發時間的 2 倍，因此同樣粒徑之飛沫，在較高相對濕度下，其將有更充分之時間可以沈降至地面。

不同粒徑飛沫之沈降距離受相對濕度之影響可由圖 5 得知，在 40% 相對濕度下，70 μm 粒徑之飛沫只能沈降約不到 50 公分之距離，但在 70% 相對濕度下，其卻可沈降約 100 cm。因此在愈濕的環境之下，將愈有利於飛沫液滴之沈積於地面上，故可減少空氣中致病毒液之個數濃度。

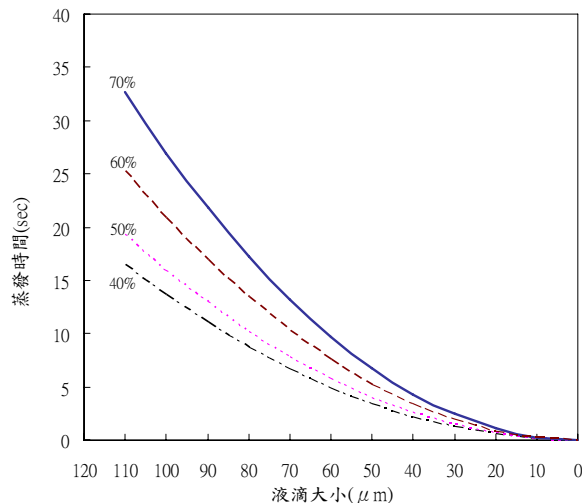


圖 4. 飛沫 20°C 時完全蒸發所需時間與相對濕度之關係

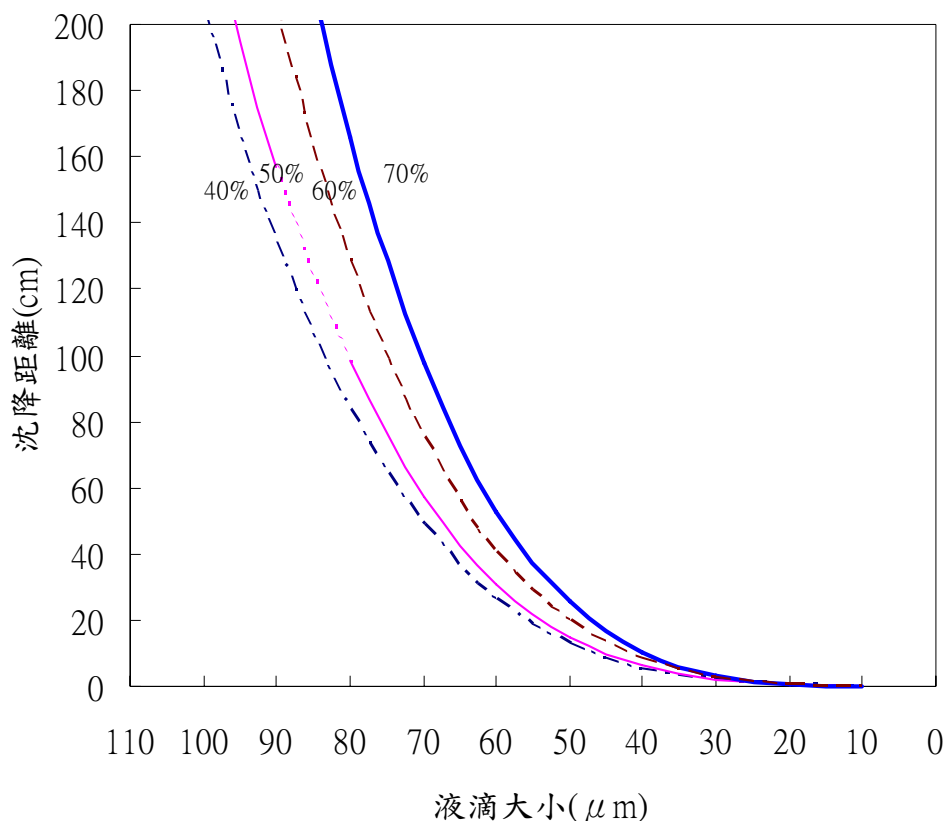


圖 5. 飛沫沉降距離與相對濕度之關係

3. Wells-Riley 方程式

本研究係一跨領域 (流行病學+工程控制) 之研究項目。為首次將空氣感染預測模式和空調外氣控制的數學模式結合,從空調工程的角度而言,此模式可以解釋很多習用的工程設計參數的由來。而從流行病學的角度而言,本研究成果可以找出某些空氣傳染病的最低工程控制參數以使空氣傳染不致發生。本研究導出的全面 (包括多區域、非穩態、非均勻分佈) 的 Wells-Riley 方程式,可全面而完整地配合醫院各區域的實際狀況,從而使空氣感染的模式更加完備,並提供感控人員相關的設計參數,以降低醫院內空氣感染。

4. 環境實測調查分析

部份我們從空氣中採樣研究發現空氣中之空氣微生物的菌屬有三類分別為革蘭氏陽性球菌 (GPC)、革蘭氏陽性桿菌 (GPB)、革蘭氏陰性桿菌 (GNB),及少部份之真菌,在真菌鑑定中找到酵母菌及青黴菌 (*Penicillium*) 等黴菌。且實驗中發現手術室環境菌屬濃度大小關係為:GPC>GPB>GNB。整個完整手術過程中採到之菌落關係為:渦流區最多,回風區次之,主流區之菌落最少。在真菌空氣菌濃度分析,我們發現大多集中於渦流區。

追縱調查手術後感染病患歷樣本所發現之酵母菌、厭氧革蘭氏陽性細菌、葡萄球菌屬、金黃色葡萄球菌等菌種,與採樣結果相吻合。在感染案例中發現,大部份之菌種為葡萄球菌屬、腸球菌、大腸桿菌、綠膿桿菌、念珠菌、酵母菌、金黃色葡萄球、厭氧革蘭氏陽性菌、桿菌屬。

氣流模擬部份研究發現 (如圖 6 所示),對於 HEPA 洩漏所產生之灰塵粒子或生物氣膠,以案例之手術室來探討手術室內之手推車放至於手術台後方,其桌面會隨著風速將灰塵粒子或生物氣膠帶到躺在手術台上方的已切開病患傷口內及已經沾滿血液的手術用刀械上面。此外當假設污染源為手術進行中由醫生手部產生,污染粒子會順著病人身上往器械桌方向流過,倘若這時病人傷口已切開試想病人感染機率必定高。

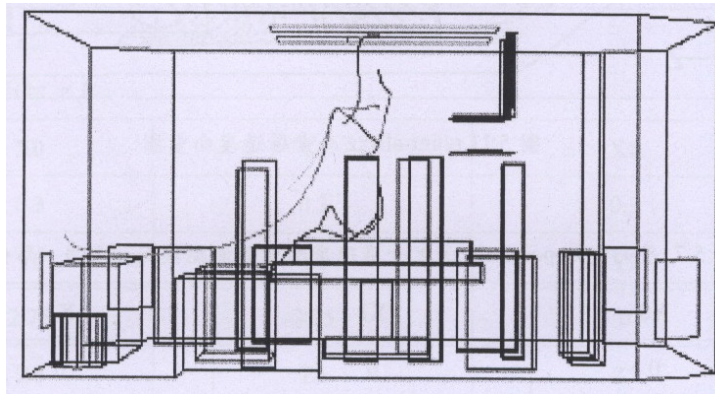


圖 6. HEPA 洩漏粒子軌跡圖，圖中曲線為洩漏粒子軌跡，方塊部分為病床和病人，軌跡最後到達病人頭部附近。

參考文獻

- ANSI/ASHRAE (2001). *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*, Atlanta, GA, American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Standard 62-2001.
- Baron, P. A. and Willeke, K. (2001). *Aerosol Measurement*, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Catanzaro, A. (1982). Nosocomial tuberculosis, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 125, 559-562.
- Fennelly, K.P. and Nardell, E.A. (1998). The relative efficacy of respirators and room ventilation in preventing occupational tuberculosis, *Infect. Control Hosp. Epidemiol.*, 19, 754-759.
- Fisk, W.J. and Rosenfeld, A.H. (1997). Estimates of improved productivity and health from better indoor environments, *Indoor Air*, 7, 158-172.
- Friedlander, S.K. (2000). *Smoke, Dust and Haze*, 2nd ed., Oxford University Press, USA.
- Hinds, W.C. (1999). *Aerosol Technology*, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Ksiazek, T.G. *et al.*, (2003). "A novel coronavirus associated with severe acute respiratory syndrome", *The New England Journal of Medicine*, 348(20), 1947-1957.
- Meschievitz, C.K., Schultz, S.B. and Dick, E.C. (1984). A model for obtaining predictable natural transmission of rhinoviruses in human volunteers, *J. Infect. Dis.*, 150, 195-201.
- Milton, D.K., Glencross, P.M. and Walters, M.D. (2000). Risk of sick leave associated with outdoor ventilation level, humidification, and building related complaints, *Indoor Air*, 10, 212-221.
- National Institute for Occupational Safety and Health (1998). *Implementation of the National Occupational Research Agenda Notice of Availability of Funds*, Atlanta, GA, Centers for Disease Control, Announcement 98044.
- Riley, R.L. and Nardell E.A. (1989). Clearing the air. The theory and application of ultraviolet air disinfection. *Am. Rev. Respir. Dis.*, 139, 1286-1294.
- Riley R.L., Mills, C.C., O'Grady, F., Sultan, L.U., Wittestadt, F. and Shivipuri, D. N. (1962). Infectiousness of air from a tuberculosis ward-ultraviolet irradiation of infected air: comparative infectiousness of different patients. *Am. Rev. Respir. Dis.*, 85, 511-525.
- Riley, B.C., Murphy G. and Riley R.L. (1978). Airborne spread of measles in a suburban elementary school, *Am. J. Epidemiol.*, 107, 421-432.
- Rudnick, S. N. and Milton, D. K. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration, *Indoor Air*, 13(3), 237-245.
- Wells, W.F. (1955) *Airborne Contagion and Air Hygiene: an Ecological Study of Droplet Infection*, Cambridge, MA, Harvard University Press.

計畫成果自評

本研究內容與原計畫相符，並達成預期目標，研究成果之有極佳之學術及應用價值，各項研究子題皆適合在學術期刊發表，本研究無申請專利，主要發現有助醫療院所面對新興空氣傳染疾病時，進行適宜之預防與管制。