

以計算流體動力學研析建築設施環境風場對 雨滴軌跡與降雨分佈之影響

CFD Investigation of the Effect of Airflow Pattern on Raindrop Trajectory and Wind-Driven Rainfall Distribution around Buildings

國立台灣大學生物環境系統工程學系
助理教授

張 倉 榮

Tsang-Jung Chang

國立台灣大學生物環境系統工程學系
碩士班研究生

吳 毓 庭

Yu-Ting Wu

摘 要

本研究藉由計算流體動力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)發展尤拉觀點(Eulerian)之環境風場模擬模式及拉格蘭觀點(Lagrangian)之雨滴軌跡追蹤模式,以計算建築物鄰近區域的環境風場、雨滴掉落軌跡與雨滴空間分佈。環境風場模式係以不可壓縮黏性流體為模式之基本架構,使用有限差分法(FDM)與大漩渦模擬(LES)紊流模式來模擬建築物附近的紊流場,而雨滴軌跡追蹤模式則主要是以釋放大量的雨滴來追蹤其傳輸軌跡、沉降路徑及終端撞擊點。本研究所發展的數值模式首先與前人風洞試驗量測結果進行驗證比對,繼而以 10 種境況案例來探討不同建築物高度與不同勁雨角(雨滴終端沉降速度對環境風場水平速度之比值)時之雨滴軌跡及其在建築物周遭的降雨空間分佈。模擬結果顯示當勁雨角愈小時,受到環境風場的影響愈大,雨滴的運動軌跡越傾斜,造成吹打在建築物表面上的雨滴數量增加,也使得建築物周遭的降雨空間分佈愈不均勻。另外,雨滴傳輸軌跡與降雨空間分佈會隨著建築物高長比的增加而更加的不均勻,迎風面區域之降雨量會大量增加,但當建築物高長比降至 1:1 以下時,建築物前後降雨分佈相差不大。本數值模式可針對相同類型不同尺寸之建築物做重複且多樣性模擬,所求得之環境風場、雨滴軌跡及降雨空間分佈等結果,可應用於建築物耐雨設計及排水系統規劃之參考。

關鍵詞：計算流體動力學,設施與環境,建築物環境風場,雨滴軌跡,降雨分佈。

ABSTRACT

The CFD wind-driven rain tracking has been generated to investigate the

redistribution of wind-driven rainfalls around a building by combining an Eulerian wind flow model as well as a Lagrangian raindrop-tracking model. The former conducts the large eddy simulation of the turbulent flows around the building and the latter performs raindrop trajectory calculations by releasing a large number of raindrops into the computational domain. The models are verified with available wind tunnel measurements and are found to be accurate. Ten sets of scenario simulations are carried out for setting various building configurations and driving rain angles. The simulated results show that the trajectories of smaller raindrops are more slanting and more influenced by the building-perturbed flow field. Impingement of raindrops on the building envelope increases from bottom to top of the building. The height of the building is a significant factor contributing to wind-driven rain redistribution. Distinct nonuniform rainfall distributions are found for scenarios with tall buildings and low driving rain angles. The simulated results of the present study can contribute to the detailed designs of rain shelter on the building as well as stormwater drainage systems around the building.

Keywords: Computational fluid dynamics, Structure and environment, Airflow field around buildings, Raindrop trajectory, Wind-driven rainfall distribution.

一、前言

雨滴在大氣邊界層降落到地面的過程中，由於其傳輸軌跡、沉降及再分佈路徑受到因地形擾亂的環境風場(topography-perturbed airflow field)之劇烈影響，使得雨滴降落在地面呈現不均勻的空間分佈現象(nonuniform spatial distribution)，最常見的狀況為降雨會集中在障礙物(如山脈)的迎風面上。一般而言，此種不均勻空間分佈現象依研究之環境風場尺度的不同而可區分為兩大類，其一是中尺度(the meso-local-scale)空間分佈，水平距離大約在 $10^3 \sim 10^6$ 公尺之間，另一則為小尺度(the micro-scale)空間分佈，水平距離大約在 $10^2 \sim 10^3$ 公尺之間 (Oke, 1987)。中尺度降雨空間分佈的相關研究是氣象學者及集水區水文學者的研究重點，許多研究指出與山脈走向垂直之氣流，受到高山阻擋，被迫抬升而冷卻(空氣每上升一百公尺氣溫約下降攝氏 0.65 度)，空氣中的水氣因而在迎風面上空凝結成較大雨滴而降落，待氣流翻越過山嶺，在背風面下降時，已變成乾燥空氣，此時因空氣被壓縮而增溫(每下降一百公尺氣溫就上升攝氏 1 度)，降雨量驟減且

雨滴較小。此種因障礙物抑制雲層，使得在迎風面增加雲層含水量轉變為雨水，而在背風面抑制雲層含水量的過程，與凝結雨滴大小有密切關聯，其數值模擬仍有許多改善的空間(Oke, 1987)。但以防洪工程設計的觀點而言，中尺度降雨空間分佈可藉由整合集水區域內各迎風面與背風面雨量站的實測雨量資訊來分析該地區降雨空間狀況。另一方面，小尺度降雨空間分佈主要是牽涉到地域性環境風場受到障礙物干擾的影響，如建築物、設施結構物、小山丘、防風林帶等，在降雨過程中完全不考慮雨滴的形成與變化之歷程，而只探討雨滴受到環境風場影響所造成的空間分佈情況。由於受限於小尺度空間(水平距離在數公里內)之內雨量站的數量通常很少，因而無法使用前面所述的整合各雨量站資訊的方式來進行評估，故小尺度降雨空間分佈需要進一步透過數值模擬或風洞試驗才能得到較完整的資訊。

一般而言，在無風且無建築設施阻擋的狀況下，雨滴主要以終端速度垂直往下掉，並且會平均掉落分佈在街道上以及建築物的表面上，如圖 1(a)所示。在有風力吹襲的空地上，雨滴運動軌

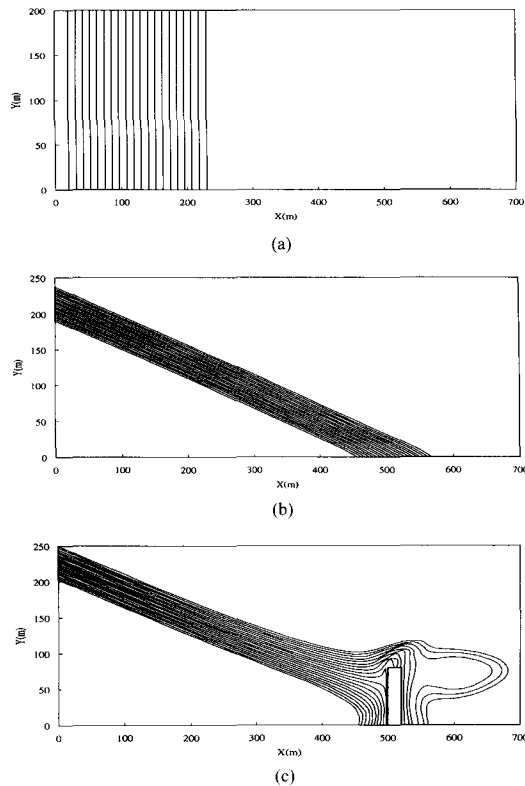


圖 1 大氣邊界層雨滴降落軌跡示意圖，(a)無風亦無建築物阻擋，(b)有風但無建築物阻擋，(c)有風且有建築物阻擋

跡會同時受到重力與風阻的雙重影響，其撞擊的位置會產生水平位移，但雨滴仍平均分佈在街道上，如圖 1(b)所示。在上述無障礙地區之雨滴運動過程中，通常將雨滴的終端沉降速度與環境風場的水平風速之比例定義為勁雨角(driving rain angle)，其物理意義為雨滴在垂直方向的沉降動量與環境風場在水平方向驅動雨滴的動量之比，其數值愈小代表環境風場對雨滴軌跡的影響愈劇烈，雨滴愈容易隨風飄蕩。此外，在台灣地區，都會區中常有建築物存在，鄉村地區或都市邊緣地帶亦常有大型倉儲與農業設施的設置，這些建築設施及其附屬設備形成複雜而特殊的環境風場，包括紊流邊界層(turbulent boundary layer)、取代氣流區(displacement zone)、停滯區域(stagnation zone)、分離點(separation point)、渦

流區(circulating zone)及尾流區(wake zone)等，使得雨滴的運動軌跡不但受到勁雨角的影響，且受到前述特殊流況所影響，造成建築設施附近地區雨滴掉落的軌跡有所改變，使其降雨呈不均勻空間分佈(圖 1(c))。在受到不均勻降雨空間分佈的影響下，這些建築設施附近地區的雨水排水系統勢必要做進一步的修正，以提供水工結構物設計者更精確的資訊。

回顧探討小尺度空間雨滴運動軌跡的文獻，目前已發展出一些數值模擬模式(Choi, 1993; 1994; 1999; Surry et al., 1994; Lakehal et al., 1995; Karagiozis et al., 1997)或相關的雨滴實驗研究(Gunn and Kinzer, 1949; Lacy, 1951; 1965)，但這些研究主要都是針對建築物表面受到環境風場雨滴影響為焦點，尤其是雨滴對建築物迎風面牆壁的傷害與對室內溼度的影響。目前除 Chang 和 Wu (2002)以防洪排水觀點來探討建築物周遭降雨空間分佈外，估算雨滴在不同勁雨角與不同高長比建築物附近的運動軌跡及其降雨空間分佈情況的文獻，至今仍未見到。因此，本研究之主要目的為發展一套可計算建築設施環境風場與雨滴在其間之運動軌跡及最終撞擊位置的數值模式，並進一步藉由此模式探討不同建築物高長比與勁雨角對雨滴運動軌跡及降雨分佈之影響，以作為建築設施週遭地區排水設施工程設計之建議。未來本數值模式並可進一步應用於相關研究課題如設施環境中噴灌系統噴灑範圍及農地中農藥水滴傳輸軌跡之計算等。

二、研究方法

模擬建築物周圍環境風場與雨滴在其間之傳輸、沉降及再分佈的數值方法包括了二大部分，分別為以尤拉觀點(Eulerian)之環境風場模擬模式及拉格蘭觀點(Lagrangian)之雨滴軌跡追蹤模式。環境風場模式係以不可壓縮黏性流體為模式之基本架構，使用有限差分法(FDM)與大漩渦模擬(LES)紊流模式來模擬建築物附近的紊流場，它首先解出風場之速度與壓力分佈，而速度分佈的結果則輸入至雨滴軌跡追蹤模式中計算各個雨滴的速度、運動軌跡及撞擊點，再藉由追

蹤模擬區域裡大量雨滴之運動軌跡，瞭解其降雨空間分佈。

2-1 建築物周遭環境風場

建築物周圍的環境風場，由於風速均在音速的三分之一以內，通常以不可壓縮黏性流體為架構，再以不同的紊流模擬模式進行計算。本研究採用目前工程界最流行的大漩渦模擬(LES)紊流模式來模擬建築物附近的紊流場，其原理是在模擬區域中藉由濾波函數將小渦流過濾出來，而只留下大尺度渦流，再計算其數值，至於被過濾的小渦流則會影響到亞格點應力(subgrid stress)的變化。令 \bar{u}_i 和 p 為在 x_i 方向中已過濾的平均速度及平均壓力，其連續方程式和動量方程式可分別以下二式表示：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v_{sgs} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

其中 ρ 代表流體密度、 ν 代表運動黏滯係數、 v_{sgs} 代表亞格點渦流黏滯係數。(2)式中之最後一項為亞格點應力，代表紊流渦流強度， v_{sgs} 受到網格大小比例及流體應變率之影響，可以下式表示之

$$v_{sgs} = (C_s \Delta)^2 \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

其中 $\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}$ 是網格大小，其定義是空間差分格點的幾何平均大小值， C_s 是 Smagorinsky 常數，通常介於 0.1~0.2 之間，本模式目前是採用 0.15，為過去模式進行參數驗證之經驗值(黃，2001；郭，2001)。

上述的控制方程式無法以數學解析求得，而須以數值方法先進行網格離散，再由網格系統中求解各網格點的速度及壓力。在本研究中，採用有限差分法(finite difference method)進行網格離

散與數值計算，控制方程式之對流項是以 3 階上風差分法來求解，擴散項則是用 2 階的中央差分法來求解，時間項用 Adams-Bashforth 法離散，壓力項則化解為 Poisson 方程式，再以迭代法求得壓力值。在邊界條件方面，主要可分為四個部分，入流邊界風速的速度值設定為指數(power law)分佈且不隨著時間改變，地面邊界設定為不滑動邊界(non-slip condition)，而出流邊界與上空邊界則均設定為速度梯度為零(zero velocity gradient)。另外，風場的初始條件則是設定為零。

2-2 環境風場雨滴軌跡追蹤模擬

雨滴軌跡在環境風場運動過程中受到雨滴在風場中之相對空氣阻力及重力的雙重影響，其拉格蘭觀點(Lagrangian)之雨滴軌跡追蹤方程式可以下列三式表示之

$$M \frac{du_i^p}{dt} = \frac{\pi}{8} \rho C_D d_p^2 (u_i - u_i^p) \sqrt{\sum (u_i - u_i^p)^2} - M \delta_{i3} g \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{dx_i^p}{dt} = u_i^p \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

其中 M 為雨滴的質量， u_i 是在 x_i 方向的風速， u_i^p 為 x_i 方向的雨滴速度， x_i^p 代表 x_i 方向的雨滴位移距離， t 為時間， g 為重力加速度， d_p 為雨滴直徑， ρ_p 為雨滴密度， ρ 為空氣密度， ν 則代表空氣動力黏滯性係數， Re 為雨滴相對雷諾數(raindrop relative Reynolds number)

$\left(= d_p \sqrt{\sum (u_i - u_i^p)^2} / \nu \right)$ ， C_D 則是雨滴的阻力係數(drag coefficient)，為 Re 的函數，(6)式之關係式為雨滴阻力經驗式(Clift et al., 1978)。

在求得 2.1 節所述及的風場速度後，(4)式中之 u_i 即為已知，此時(4)、(5)及(6)式為非線性常微分方程式組，本研究使用 4 階 Runge-Kutta 法來求解每個雨滴在每個時間的速度及其軌跡。軌跡的計算係從一開始釋放時就追蹤，直到雨滴碰

到地面或是建築物表面方才停止。藉由在相同高度但不同水平位置釋放大量的雨滴，每個案例至少釋放追蹤 1000 顆水滴以上，且流況愈複雜，追蹤水滴增加愈多，再追蹤其傳輸軌跡、沉降及再分佈路徑，並將每個計算所得之雨滴軌跡路徑加以統計，即可計算建築物附近降雨空間分佈。

在目前的研究中，尚未將雨滴蒸發(raindrop evaporation)及雨滴破裂(raindrop break)等因素加以考量，因此在雨滴運動過程中係假設雨滴一直維持球狀，且其直徑不變。因此在相同的環境風場之下，由於雨滴所承受之相對空氣阻力及重力僅為雨滴直徑的函數，使得相同直徑的雨滴，其運動軌跡應為相同。此外，本研究同時假設建築物附近的紊流場不會受到雨滴的運動而有任何影響，使得紊流場與雨滴運動間之關係為單向的，這也意味著在雨滴降落期間，雨滴的體積相對於大氣空間是可以忽略的。Gunn 及 Kinzer (1949)曾測量降雨強度為 10mm/hr 時，雨滴體積對大氣空間之相對比值僅為 5×10^{-7} ，故本假設基本上是合理的。

三、模式驗證

本研究在尚未進行建築物環境風場流況模擬之前，首先與風洞量測實驗(Gerdes 及 Olivari, 1999)數據進行驗證比較。此實驗中風洞的大小為 $2\text{m} \times 0.34\text{m} \times 0.34\text{m}$ ，風洞裡面所擺設的是兩個平行建築物，其高度分別是上游地區 0.03 公尺高的低建築物及下游地區 0.05 公尺高的高建築物，建築物厚度均為 0.002 公尺，兩個建築物中間的距離為 0.045 公尺，風洞在入流邊界風速為 1.7m s^{-1} ，當風場流速達到穩態的時候，風場的雷諾數大約為 3,400(特性長度取最高建築物之高度)，但此流場的特性不因雷諾數的增高而改變(Xia 及 Leung, 2001)。建築群中間地帶的模擬平均流速分佈如圖 2 所示，從圖中可發現因為下游高建築物阻擋部分的氣流，使得氣流被迫以順時針方向流向上游建築物的後方，因此在兩個建築物之間產生一強勁的順時針渦流，該渦流的最大速度約為 1m s^{-1} 。比較本研究之模擬流況與風洞實驗的量測資料，其結果十分吻合。透過風

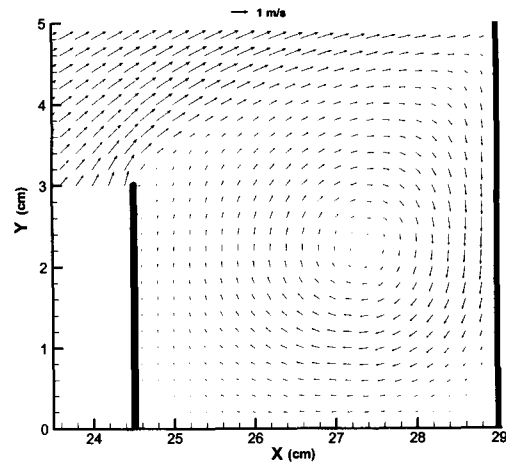


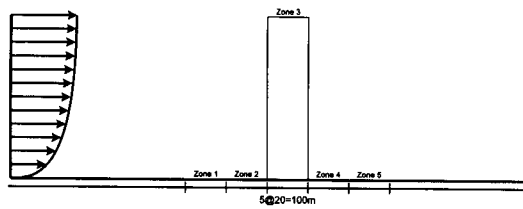
圖 2 環境風場模式驗證

洞實驗的驗證可證明本數值模式在建築物環境風場中境況模擬的準確性。

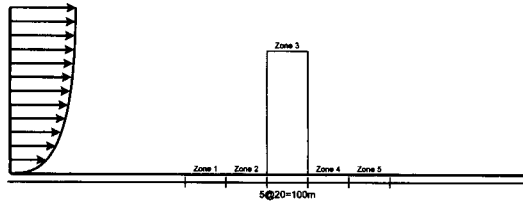
四、模擬結果與討論

如前所述，環境風場中雨滴的軌跡及其撞擊點主要是受到勁雨角與建築物周遭環境風場的影響，當邊界層入流風場流經建築物時便會產生不同的紊流場，使得雨滴軌跡和落至地面的最終撞擊位置都會受到風場的影響而改變。本研究設定模擬區域為 20°C 等溫風場，採用了四種不同高長比的建築物來進行境況模擬(如圖 3 所示)，將建築物長度(L)固定為 20 m，其高度(H)對長度比例大小分別為 4:1, 3:1, 2:1 及 1:1，第五種流況則為無建築物之環境風場，以作為對照。風場的入流風速剖面均採用指數分佈 $U = U_r (Z/Z_r)^{0.299}$ ，式中的 Z_r 代表入流風場的高度、 U_r 是入流風場的風速，其值分別採用 $Z_r = 10\text{m}$ ， $U_r = 5\text{m s}^{-1}$ ，在高度超過 10 m 的入流風速則均為 5m s^{-1} 。模擬區域大小為 $15\text{H} \times 8\text{H}$ ，建築物的水平位置在 6H 至 7H 的計算區域中，數值網格依 601×301 不均勻網格佈置，其中數值網格大小的配置採用水平方向網格均為 2 m，垂直方向在地表至 4H 間網格為 2 m，在 4H 至 8H 間為 4 m，故模擬區域約產生 180,000 個網格點。

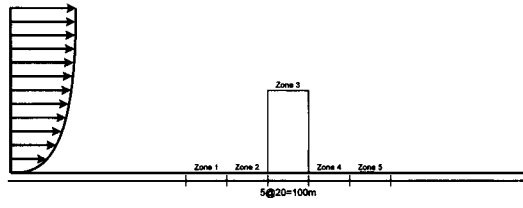
模擬結果分建築物周遭環境風場、風驅雨滴軌跡及風驅雨滴分佈等三個部分，分述如下：



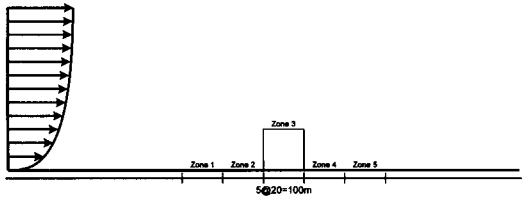
(a)



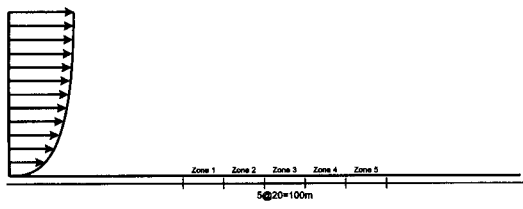
(b)



(c)



(d)

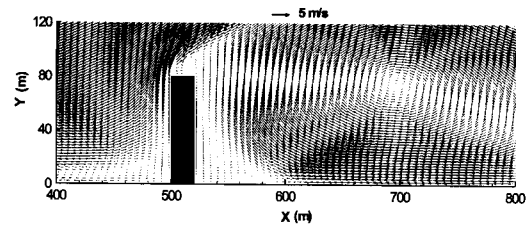


(e)

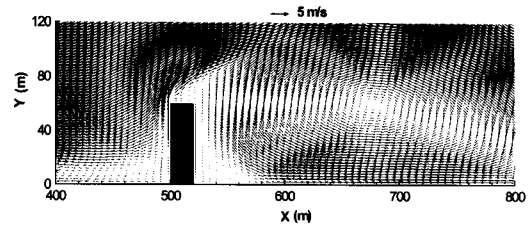
圖 3 建築設施環境風場境況模擬示意圖，建築物高長比(a)4:1，(b)3:1，(c)2:1，(d)1:1，(e)無建築物對照組

4-1 建築物周遭環境風場(Airflow pattern around buildings)

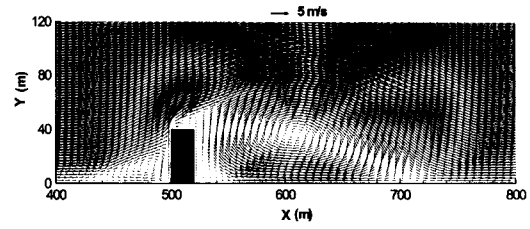
本研究以四種高長比不一的建築物及一無建築物之對照環境風場為五種流場案例，進行風



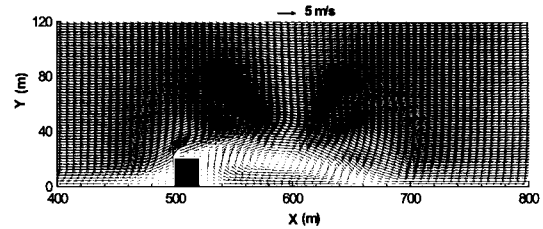
(a)



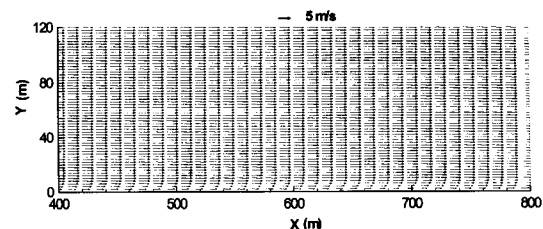
(b)



(c)



(d)



(e)

圖 4 建築設施環境風場流速圖，建築物高長比(a)4:1，(b)3:1，(c)2:1，(d)1:1，(e)無建築物對照組

場流速及壓力的數值模擬，此五種流場案例之模擬流速圖如圖 4 所示，各案例之流場雷諾數

表 1 雨滴軌跡與降雨分佈模擬案例

模擬案例	建築物形式	建築物高長比	入流風速 U_r (m s ⁻¹)	雨滴直徑 d_p (mm)	雨滴沉降速度 U_T (m s ⁻¹)	勁雨角 (U_T/U_r)	雨滴分佈 變異係數
1	I	4:1	5	0.25	0.91	0.18	0.249
2	II	3:1	5	0.25	0.91	0.18	0.222
3	III	2:1	5	0.25	0.91	0.18	0.183
4	IV	1:1	5	0.25	0.91	0.18	0.054
5	V	—	5	0.25	0.91	0.18	0
6	I	4:1	5	2.0	6.90	1.38	0.135
7	II	3:1	5	2.0	6.90	1.38	0.133
8	III	2:1	5	2.0	6.90	1.38	0.131
9	IV	1:1	5	2.0	6.90	1.38	0.045
10	V	—	5	2.0	6.90	1.38	0

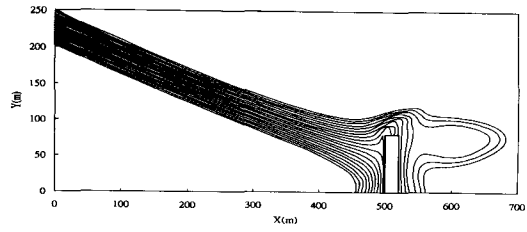
(flow-field Reynolds number) ($= U_r H / \nu$) 均約為 $O(10^7)$ ，其特性長度為建築物高度，特性速度為流場的入流風速。圖 4 中這四個模擬風場的流況大致上是一致的，由於受到建築物的阻擋效應，部份氣流會由建築物上方加速地繞過，造成流線聚集，使得原先之氣流被後來加速吹進的氣流所取代，在建築物正前上方形成取代氣流區 (displacement zone)；部份氣流則向下沖流，在建築物迎風面 (windward side) 形成一個順時針方向旋轉的漩渦 (vortex) 或稱下沖渦流區 (downwash circulating zone)，其大小及強度依建築物高長比的增加而增大。在背風面 (leeward side)，建築物的阻擋造成流場分離，產生兩個大小不一之漩渦，大型的順時針方向漩渦又稱尾流區 (wake zone)，位於建築物的正後方，為一低壓、流速緩慢但流場紊亂之區域，其範圍可到達下游約 10 至 15 倍建築物高度處；另一個漩渦則是位於建築物正後下方緊貼著建築物的逆時針方向漩渦，其大小隨建築物高長比的增加而增加。此三個漩渦的大小及位置與建築物高長比有很密切的關係。

另一方面，建築物高長比愈大，氣流受到建築物的壓迫而使得更多氣流必須向上抬升，在建築物迎風面形成更強且更大的取代氣流區與下沖逆流區；在建築物背風面則是有更大但強度更弱的尾流區。另外，無建築物之對照環境風場則明顯為典型之大氣邊界層風場。

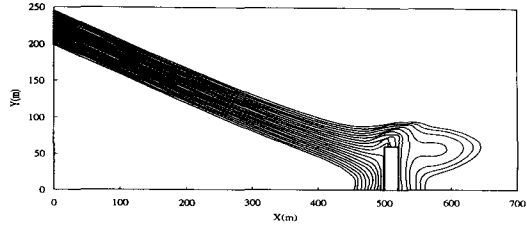
4-2 風驅雨滴軌跡 (Wind-driven rain trajectory)

上節的數值模擬已得到四種不同高長比建築物及無建築物之對照組的環境風場模擬流速圖，圖 4 可清楚得知風場內各區域之流速、紊流邊界層、取代氣流區、停滯區域、分離點、渦流區及尾流區等特性。這些特性都會直接影響雨滴的運動軌跡及撞擊點。

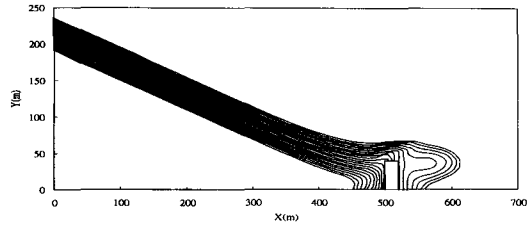
為計算雨滴受到風場影響的風驅雨滴軌跡，本研究釋放大量的雨滴粒子至環境風場中，再聯立求解 (4)、(5) 及 (6) 式之雨滴軌跡追蹤模式，以追蹤其運動軌跡、沉降及再分佈路徑。研究中共選擇 10 個境況案例來進行模擬，如表 1 所示。這 10 個境況案例主要是將之前的 5 種環境風場分別再搭配兩種不同雨滴直徑 ($d_p = 0.25\text{mm}$ 及 $d_p = 2\text{mm}$)，使其產生兩種勁雨角 (雨滴終端沉降速度對環境風場水平速度之比值) 0.18 及 1.38，以瞭解不同建築物高度與不同勁雨角時之雨滴軌跡。計算方式是首先在模擬區域裡放入至少 1,000 顆的雨滴，並以固定的 Δt 時間間距記錄下雨滴的運動速度及軌跡，直到雨滴碰到地面或是建築物表面，方才停止計算該顆雨滴的運動軌跡。本研究將模擬雨滴的初始位置設在 400m 高度上，水平位置則是設定在一個限定範圍內均勻分佈雨滴，使得雨滴能夠掉落在建築物附近的五個區域中，即 Zone 1、Zone 2、Zone 3、Zone 4、Zone 5 等 (圖 3)。在雨滴的初始速度中，雨滴的水平速度假設與入流風速一樣，而垂



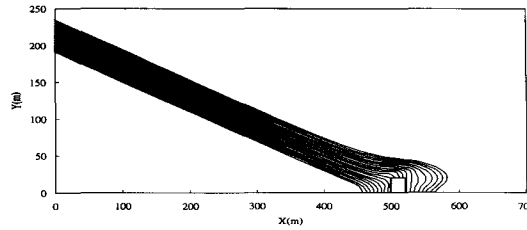
(a)



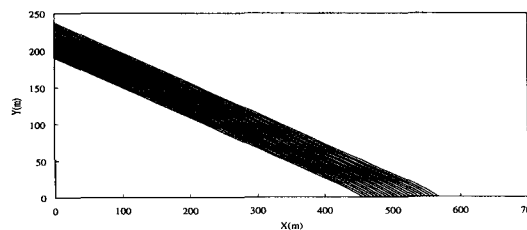
(b)



(c)

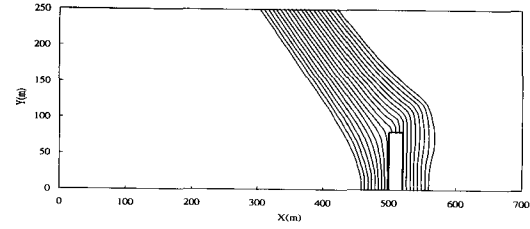


(d)

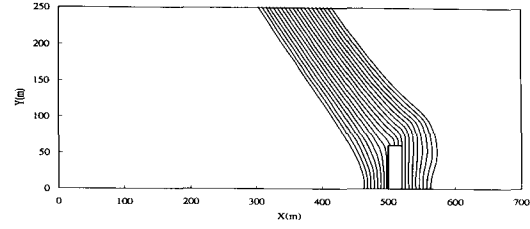


(e)

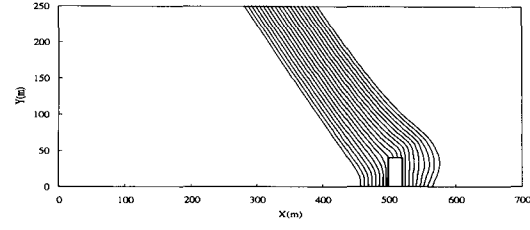
圖 5 勁雨角為 0.18 下之雨滴傳輸軌跡圖，建築物高長比(a)4:1，(b)3:1，(c)2:1，(d)1:1，(e)無建築物對照組



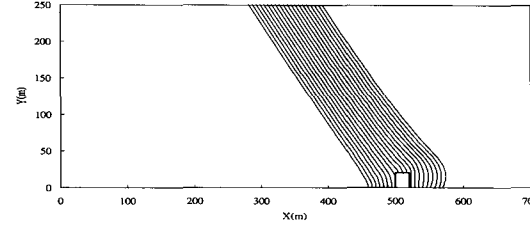
(a)



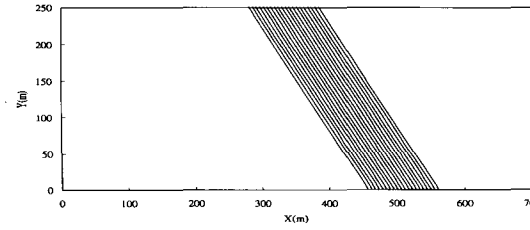
(b)



(c)



(d)



(e)

圖 6 勁雨角為 1.38 下之雨滴傳輸軌跡圖，建築物高長比(a)4:1，(b)3:1，(c)2:1，(d)1:1，(e)無建築物對照組

直速度則是假設為終端速度。

圖 5 和圖 6 分別為雨滴之勁雨角為 0.18 及

1.38 時之雨滴傳輸軌跡圖，從圖中可以明顯看出雨滴軌跡受風場影響的結果。雨滴在運動過程

中，當勁雨角為 0.18 此等小值時，受到環境風場的影響愈大，其運動軌跡越傾斜，部份雨滴會受到風場中取代氣流區及渦流區的作用而流入建築物的屋頂或是跨越建築物的屋頂而迴流到建築物的後方，造成吹打在建築物表面上的雨滴數量增加，也使得建築物周遭的降雨空間分佈愈不均勻。當勁雨角大如 1.38 時，雨滴垂直降落的動量遠大於風場水平驅動動量(horizontal driving momentum)，使得雨滴的運動軌跡受到環境風場的影響較小，雨滴軌跡不是直接垂直向下掉落，就是稍微有水平位移而垂直掉落。另外建築物的高長比也是一個影響雨滴傳輸軌跡的重要因素，建築物迎風面區域之雨滴終端撞擊數目會隨著建築物高長比的增加而大量增加，尤其是迎風面的上緣部。

4-3 風驅雨滴分佈(Wind-driven rainfall distribution)

利用上節中計算而得的雨滴運動軌跡，本研究進一步將各釋放雨滴的終端撞擊位置一一分別劃分區域，並再歸納其空間分佈狀況。劃分區域中主要是先設定建築物為中心區域(Zone 3)，然後再分別向風場的上游地區(Zone 1 及 Zone 2)，以及下游地區(Zone 4 及 Zone 5)各自劃分兩個區域，詳如圖 3 所示。而在計算雨滴空間分佈的過程中，係將這 5 個區域中的各別區域雨滴撞擊數量除上全部雨滴撞擊數量，使得每個區域的雨滴空間分佈百分比可以清楚得知，如圖 7 所示。

必須強調的是，本研究假設雨滴在撞擊到建築物表面或是地表時，表面為不透水層，故雨滴將會完全累積成雨水成為地表逕流而順著區域雨水下水道排放出去。由於目前台灣地區大多採用不滲水材料來作為建築設施、道路及人行道的表面鋪設，使得雨滴幾乎都要匯集到下水道排放出去，此時，在建築物附近的降雨空間分佈會影響到建築物周遭地區累積降雨的排放量。因此，Zone 2 的雨滴終端撞擊數量包括了打到該區域地面及建築物迎風垂直表面，而 Zone 4 的雨滴終端撞擊數量則涵蓋了打到該區域地面及建築

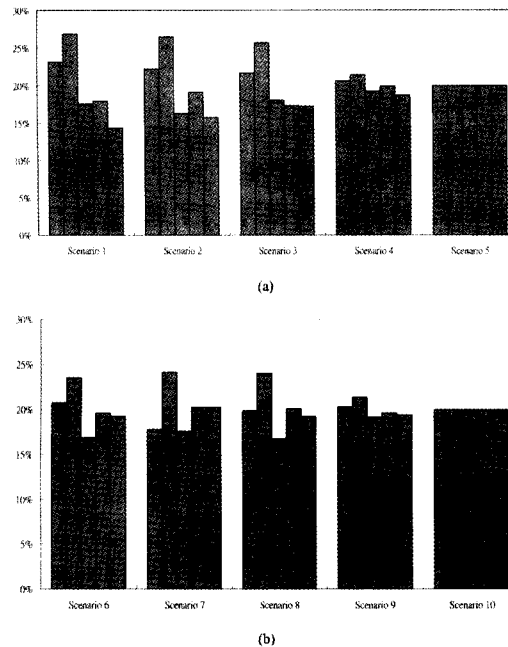


圖 7 各種研究案例之降雨空間分佈

物背風垂直表面。其它的區域 (Zone 1、Zone 3 及 Zone 5) 則是只有計算雨滴打到地面或屋頂的數量。

由圖 7 中可以清楚地發現，建築物的迎風面 (Zone 2) 受到雨滴撞擊的比例最高，這其中的因素包括了勁雨角以及建築物的攔截效應。此外在背風面中，部分雨滴受到建築物的阻擋，雨滴撞擊到地表面或是建築物表面的比例相對降低，尤其在建築物高長比愈大的情況下，其不均勻分佈的情形更為明顯。當雨滴之勁雨角為 0.18 時，隨著建築物高長比的增加，建築物的上游地區 (Zone 2) 雨量大約會較無建築物阻擋時增加 10%-40%，在下游地區 (Zone 4) 雨量則大約會減少 5%-20%；當雨滴之勁雨角增至 1.38 時，相同但較小的降雨空間分佈差異亦可發現。在表 1 中的最後一行列有模擬的 10 個案例之降雨空間分佈變異係數(coefficient of variation)，其計算方式係將各案例的 5 個劃分區域進行變異數計算。變異係數愈大代表降雨空間分佈愈不均勻，變異係數為零則表示均勻空間降雨。由圖 7 可知，雨滴傳輸軌跡與降雨空間分佈會隨著建築物高長比

的增加而更加的不均勻，迎風面區域之降雨量會大量增加，但當建築物高長比降至 1:1 以下時，建築物前後降雨分佈相差不大。

本研究目前所釋放的雨滴粒子為單一粒徑，故雨滴數量愈多代表降雨量愈大。但真實的降雨其雨滴粒徑是有分佈的，以美國華盛頓特區為例，在降雨強度為 10mm/hr 時，其 D_{50} 粒徑為 1.8 mm，而其 D_{10} 粒徑為 1.0 mm (Murakami 及 Assouline, 1986); 以台北市台灣大學校區為例，在降雨強度為 10mm/hr 時，其 D_{50} 粒徑為 1.6 mm，而其 D_{10} 粒徑為 0.9mm(張, 1990)。故本研究在未來將擴展進行建築設施環境風場對多粒徑雨滴之雨滴軌跡與降雨分佈之影響。

五、結論

本研究整合尤拉觀點(Eulerian)之環境風場模擬模式及拉格蘭觀點(Lagrangian)之雨滴軌跡追蹤模式，以數值境況模擬方式探討小尺度降雨空間中建築物附近區域的環境風場、雨滴運動軌跡與雨滴空間分佈的關係。本研究發展的數值模式以 10 種境況案例來探討不同建築物高長比與勁雨角時之雨滴軌跡及其在建築物周遭的降雨空間分佈。研究結果所歸納之結論分述如下：

1. 當雨滴顆粒越小，其勁雨角越小，受到環境風場的影響愈大，它的運動軌跡就愈傾斜，造成愈多雨滴降落在建築物前方區域上，也使得建築物周遭的降雨空間分佈愈不均勻。
2. 雨滴顆粒愈大，所受到重力影響也相對增加，其運動軌跡愈垂直，建築物周遭的降雨空間分佈愈均勻。
3. 建築物的高長比也是一個重要的因素，它會影響雨滴傳輸軌跡與降雨空間分佈變異性。當雨滴之勁雨角為 0.18 時，建築物的上游地區雨量大約會較無建築物阻擋時增加 10%-40%，在下游地區雨量則大約會減少 5%-20%。
4. 雨滴傳輸軌跡與降雨空間分佈會隨著建築物高長比的增加而更加的不均勻，迎風面區域之降雨量會大量增加，但當建築物高

長比降至 1:1 以下時，建築物前後降雨分佈相差不大。

參考文獻

1. 黃俊強, 2001, “低層建築物環境風場與風載之數值研究”, 國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文。
2. 郭鴻興, 2001, “以計算流體動力學分析自然通風低層建築物之通風特性”, 國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文。
3. 張宜信, 1990, “台北地區自然降雨之雨點粒徑分佈及其與降雨強度之關係”, 國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文。
4. Chang, T. J., and Wu, Y. T., 2002. “Wind-Driven Rain Trajectories around Street Canopies”, Journal of the American Water Resources Association. (Accepted)
5. Choi, E.C.C., 1993. “Simulation of Wind-Driven-Rain around a Building”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46&47, 721-729.
6. Choi, E.C.C., 1994. “Determination of Wind-Driven-Rain Intensity on Building Faces”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 51, 55-69.
7. Choi, E.C.C., 1999. Wind-Driven Rain on Building Faces and the Driving-Rain Index. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 79, 105-122.
8. Gunn, R., and Kinzer, G.D., 1949. “The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air”, Journal of Meteorology, 6, 243-248.
9. Gerdes, F., and Olivari, D., 1999. “Analysis of Pollutant Dispersion in an Urban Street Canyon”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 82, 105-124.
10. Karagiozis, A., Hadjisophocleous, G., and Cao, S., 1997. “Wind-Driven Rain Distributions on Two Buildings”, Journal of Wind Engineering

- and Industrial Aerodynamics, 67&68, 559-572.
11. Lacy, R.E., 1951. "Distribution of Rainfall round a House", Meteorology Magazine, 80, 184-189.
 12. Lacy, R.E., 1965. "Driving-Rain Maps on the Onslaught of Rain on Buildings", Building Research Station, Current paper No. 54, Garston, UK.
 13. Lakehal, D., Mestayer, P.G., Edson, J.B., Anquetin, S., and Sini, J.F., 1995. "Euler-Lagrangian Simulation of Raindrop Trajectories and Impacts within the Urban Canopy", Atmospheric Environment, 29(23), 3501-3517.
 14. Murakami, Y., and Assouline, S., 1986. Mathematical Model for Rain Drop Distribution and Rainfall Kinetic Energy. Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 29(2), 494-500.
 15. Oke, T.R., 1987. "Boundary Layer Climates", 2nd Edition, Methuen, London.
 16. Surry, D., Inculet, D.R., Skerlj, P.F., Lin, J.X., and Davenport, A.G., 1994. "Wind, Rain and the Building Envelope: a Status Report of Ongoing Research at the University of Western Ontario", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 53, 19-36.
 17. Xia, J.Y., and Leung, D.Y.C., 2001. "Pollutant Dispersion in Urban Street Canopies", Atmospheric Environment, 35, 2033-2043.

收稿日期：民國 91 年 6 月 12 日
修正日期：民國 91 年 8 月 5 日
接受日期：民國 91 年 8 月 19 日