

植栽及透水鋪面對街道表面溫度之模擬

邱英浩* 汪至佳** 江志成***

關鍵字：熱島效應，CFD，熱通量，戶外熱環境

摘要

都市化導致都會生活空間品質日漸惡化，其中都市化所造成之熱島效應更是熱舒適惡化之主要原因之一，對於地小人稠的台灣而言，都市高溫現象更是明顯，近年相關研究發現，都市中常見之綠地、植栽、透水性鋪面及水體等，因具有大熱容量之物理特性，可有效吸收熱量，並藉由蒸發散的功能促使空氣溫度降低，達到調節微氣候的效果，維持微氣候之穩定（孫振義等，2010；林子平等，2001）。故本研究透過台中水湳經貿園區之街道形式配置模擬，設定不同鋪面之熱通量以及植栽孔隙率，藉由模擬熱通量之吸、放熱研究透水鋪面、不透水鋪面及植栽葉面密度對於街道熱環境之影響研究。研究中實際量測透水及不透水鋪面之熱通量以及人行高度之風速作為 CFD 邊界條件設定之參考，調整 CFD 模型進行不同鋪面類型與植栽葉面密度之變因分析，部分研究結果可知，鋪面種類之熱通量設定差距越大，鋪面溫度差異越大，與設定之基準溫度相比，鋪面溫度最多上升 177.7%，透過植栽設定模擬可知，種植喬木的透水鋪面溫度最多較設定之基準溫度下降 25.9%。

Simulation of the Influences of Planting and Pervious Pavement on the Street Surface Temperature

Yin-Hao Chiu* Chih-Chia Wang** Chih-Cheng Chiang***

KEYWORDS: Heat Island Effect, Computational Fluid Dynamics, Heat Flux, Outdoor Thermal Environment

ABSTRACT

Urbanization gradually results in the deterioration of the quality of life. One of the main reasons for deterioration in the comfort level is the heat island effect. In Taiwan where there is high population density on a small piece of land, the phenomenon of high temperature in urban area is especially evident. In recent studies, it has been found that green land, vegetation, pervious pavement and water bodies can regulate a micro-climate because of their high thermal capacity. Those elements can effectively absorb a large quantity of heat and reduce the air temperature (Sun, 2010; Lin, et al., 2001). The present study selected Taichung Gateway Park as an example specifying heat flux and tree porosity under different conditions. Through simulation, the effect on the thermal environment of different pavements and tree porosities was investigated. The experimental results including heat flux of various pavements and wind speeds at pedestrian level were used for the specification of boundary elements in CFD calculations. After validation, parameter studies were carried out under other conditions. Part of the results shows the highest pavement temperature can reach approximately 177.7% compared to the reference temperature. The use of pervious pavement with trees can reach a maximum of a 25.9% difference from the reference temperature.

收件日期：2013.01.28；接受日期：2013.08.26

*中國文化大學建築及都市設計學系教授（通訊作者 Email: qyh3@faculty.pccu.edu.tw）
Professor, Department of Architecture and Urban Design, Chinese Culture University, Taiwan

**中國文化大學建築及都市設計學系博士生

Ph. D., Department of Architecture and Urban Design, Chinese Culture University, Taiwan

***中國文化大學建築及都市設計學系博士生

Ph. D., Department of Architecture and Urban Design, Chinese Culture University, Taiwan

DOI: 10.3966/101632122014060088005



一、前言

都市化的現象導致自然環境造成嚴重衝擊與變遷，都市環境之生活品質及環境景觀亦日漸惡化，其中都市的熱島效應更是舒適程度惡化的主要原因之一。台灣人口和產業朝向都市集中的趨勢更為明顯，都市化程度已高達 70%。對於地小人稠的台灣而言，都市熱島效應更是明顯，台灣平均氣溫從 1901 年到 2000 年上升達攝氏 1.1°C，暖化速率幾乎是全球的兩倍（林炯明，2010）。根據林憲德等人於 1999 年研究成果顯示台灣 4 大都會區之夏季午夜都市熱島強度，約為 4.5-2.7°C。此外研究結果也潛在反映出台灣都市透水不良的問題（林憲德等，2001；林子平等，2005），公園綠地關建的不足及缺乏透水鋪面的設計，常導致雨季時有淹水情事發生，也無法有效調節都市微氣候，因此如何改善台灣都市環境為當前要務。

1.1 研究目的

近年相關研究發現，都市中常見之綠地、植栽、透水性鋪面及水體等，具有大熱容量之物理特性，可有效的吸收大量的熱量，並藉由蒸發散的功能促使空氣溫度降低，達到調節微氣候的效果（孫振義等，2010；林子平等，2001；林憲德，1999）。以目前相關研究內容而言，針對不同植栽種類及鋪面材質對微氣候影響之研究較罕見，故本研究在於探討透水鋪面之熱通量的變化程度與不同植栽的種類，以枝葉孔隙的疏密程度、樹形以及配置條件等因素，對於周邊之微氣候影響，提出透水鋪面及植栽於熱、風環境控制之設計原則，並以台中水湳經貿園區為實驗對象，運用計算流體力學（Computational Fluid Dynamics）作為主要研究工具，藉由 CFD 快速且可大量改變參數進行模擬運算之優勢，綜合解析透水鋪面與植栽對於風環境及溫熱條件的改變，藉以得出最佳化之植栽與透水鋪面選用原則，依據分析結果提出減緩都市熱島效應的有效方針。本研究之主要目的如下：

- (1) 不同鋪面材質對街道熱環境之影響
- (2) 植栽孔隙率對街道熱環境之影響

1.2 文獻回顧

本研究以下針對都市熱島效應、透水鋪面、植栽與氣溫關係及都市熱環境之模擬研究進行說明：

(1) 都市熱島效應

都市建成環境因大量不透水鋪面（Impermeable pavement）與建築物取代自然地表，以及各種人造熱源（Anthropogenic heat flux）的排放，使得都市中心的溫度高於其周邊郊區的現象，稱為都市熱島效應（Urban heat island effect）（Landsberg, 1981），其造成原因有四，其一為都市環境綠地不足（Wong & Yu, 2005），水泥與柏油取代了植被空間，使得植物及土壤的「含水」乃至水分透過自然蒸散的降溫功能遽減；其二為人口過度集中，因都市人口需求而造成高聳而縱橫交錯的建築，降低了都市的通風效率；其三為人工發散熱大（Ichinose, et al., 1999; Taha, 1997），在交通需求增加之下，汽機車製造的污染物質（懸浮微粒）容易在都市上空形成雲霧，雖然白天會有遮蔽陽光的效果（從而能局部降溫），卻在夜間阻礙熱氣的散逸，都市夜晚的增溫變得明顯；其四，為建築物材料影響（Prado & Ferreira, 2005），都市裡有大量的鋼筋水泥建築、磚石構造與柏油路面，其熱傳導率和熱容量都很高，會吸收大量的太陽輻射，使得都市有如一座發熱的島嶼（Lin, et al., 2007; 孫振義及林憲德，2006）。

(2) 透水鋪面、植栽與氣溫關係

陳澄世及巫嘉綺（2011）以台南市公園綠地植栽與鋪面型態之溫熱環境做研究，運用紅外線測溫熱像進行實地實驗，結果發現鋪面類型以草地降溫 0.25°C 為最佳。植栽樹蔭濃密度以極濃密與濃密達降溫效果最佳，可降溫約 1°C；孫振義等（2010）探討台南市地表溫度與地表覆蓋關係，研究結果顯示地表溫度與常態化差異植生指標（normalized difference vegetation index, NDVI）呈現負相關、與地表不透水率、建築物及鋪面比例呈現正相關，顯示適當增加都市綠化或降



低地表不透率、建築物及鋪面比例將有助於降低地表溫度。根據回歸分析解果顯示：地表溫度於春、夏季與鋪面比率及地表不透水率關係較密切；夏、秋季時則是以地表不透水率及代表綠化程度的NDVI關係較強。林憲德（1999）研究指出，若要降低熱島效應強度，應從擴建綠地系統的規模，如都市大型綠地與園道，對於緩和都市熱島效應具有關鍵性的影響力。

(3) 都市熱環境之模擬研究

都市熱環境之模擬研究由Kazuya Takahashi 等於2004年分別藉由實測校園綠地、市中心商業區以及不透水鋪面廣場之溫度分布與CFD模擬比較驗證，（Takahashi, et al., 2004）。而Mirela Robitu等人於2006

年則是探討植栽與水體於都市熱環境之數值模型建立方法，以數值模型與實測數據互相驗證植栽與水體在輻射熱傳中之降溫效果（Robitu, et al., 2006）。國內相關研究則有藉由CFD模擬探討建築牆面、地表鋪面以及植栽效益減緩都市熱島之研究（林優陸，2009），其中建築牆面與地表鋪面之參數為參考實測材質之太陽輻射反射率設定。吳黛岑（2007）的研究中，則是以孔隙率設定植栽對於風場與溫度場之影響，藉以討論集合植栽於住宅中庭對微氣候影響之模擬。而邱英浩（2012）則透過植栽孔隙率、鋪面熱通量設定以及街道尺度等影響都市熱環境因素進行模擬與實測之比較，並藉由不同比例之透水鋪面以及植栽孔隙率等設定，綜合性探討都市設計對於環境舒適度之影響。

表 1 相關文獻

作者	年代	研究內容
邱英浩	2012	利用 CFD 進行環境分析，以實際量測都市風場、植栽風速衰減趨勢以及透水鋪面熱通量作為 CFD 之驗證，針對「街道尺度」、「透水鋪面百分比」以及「植栽」等環境變因對環境微氣候的影響探討，以模擬運算結果進行分析。
陳滢世及巫嘉綺	2011	運用紅外線測熱進行實地實驗，結果發現鋪面類型以草地降溫 0.25°C 為最佳。植栽樹蔭濃密度以極濃密與濃密達降溫效果最佳，可降溫約 1°C。
孫振義等	2010	探討台南市地表溫度與地表覆蓋關係，研究結果顯示地表溫度與常態化差異植生指標（normalized difference vegetation index, NDVI）呈現負相關、與地表不透水率、建築物及鋪面比例呈現正相關，顯示適當增加都市綠化或降低地表不透水率、建築物及鋪面比例將有助於降低地表溫度。
Lin, T. P. et al.	2010	透過實測進行冬夏兩季之戶外熱環境研究，藉由不同鋪面類型之熱傳導以及空氣溫度、太陽輻射等進行分析。部分研究指出，除了夏季中午外，不同類型鋪面對於空氣溫度影響不明顯。而夏季時，人工鋪面之表面溫度高於草地約 10°C。
林優陸	2009	藉由 CFD 模擬探討建築牆面、地表鋪面以及植栽減緩都市熱島之效益，其中建築牆面與地表鋪面之參數為參考實測材質之太陽輻射反射率設定。
吳黛岑	2007	利用 CFD 中孔隙率設定，模擬植栽對於風場與溫度場之影響，藉以討論集合植栽於住宅中庭對微氣候影響。
孫振義及林憲德	2006	以台南共計十四個行政區為實測範圍，以汽車移動法所得之數據配合各項基礎資料進行比對分析，得到結論：(1)由於氣溫低的天候條件下都市熱島效應會更顯著。(2)人口數低於三萬人且平均人口密度低(3~4 人/公頃)的城鎮，亦會產生顯著的都市熱島強度。(3)都市人口數、人口密度、非農業人口比例等因素，與都市熱島強度存在顯著的相關性。
Robitu, M. et al.	2006	探討植栽與水體於都市熱環境之數值模型建立方法，以數值模型與實測數據互相驗證植栽與水體在輻射熱傳中之降溫效果。
Takahashi, K. et al.	2004	探討都市環境數值模型之參數設定模式，藉由實測校園綠地、市中心商業區以及不透水鋪面廣場之溫度分布與 CFD 模擬比較驗證，探討都市環境數值模型之參數設定模式。

二、研究方法與模擬設定

2.1 研究方法

本研究主要變因為鋪面熱通量及植栽類型，過程中以實際量測收集各項大氣中各項物理數值，作為 CFD 模擬設定及驗證之參考，而後，藉由 CFD 模擬探討變因對於都市中街道熱環境之影響。實際量測包括鋪面熱通量以及鋪面人行高度之物理環境，而 CFD 模擬則包含了不同鋪面熱通量差距以及不同孔隙率設定，作為都市中街道熱環境之模擬，故本研究之主要研究方法為實際量測與數值模擬。

2.2 實際量測

實際量測分別於人行環境之透水與非透水鋪面區域（詳圖 1），收集風速、鋪面熱通量數值。藉由同時間在兩測點上進行相同數值的收集。以收集之物理數值，作為驗證數值模擬之依據。透過各項物理數值間的相對評估，探討不同鋪面材質與植栽類型對於街道物理環境之影響。實際量測各種鋪面熱通量如表 2 所示，草地鋪面呈現吸熱之情形，其所測得熱通量介於 -46 W/m^2 至 -157 W/m^2 ，而植草磚、人行道以及混凝土鋪面則是呈現鋪面放熱之情形，其熱通量介於 19 W/m^2 至 598 W/m^2 之間。若依熱通量將其區分為吸熱及放熱兩種鋪面，吸熱之透水鋪面與放熱之非透水鋪面其熱通量差 (ΔH)，最大約為 750 W/m^2 ，最小約為 70 W/m^2 。

2.3 數值模擬

本研究使用 Fluent 軟體進行模擬，藉由實測以及文獻回顧，探討 CFD 模擬時邊界條件與紊流模型設定，以進行不同鋪面與植栽類型模擬比較。模擬利用 CFD 軟體中熱通量 (Heat flux) 設定作為不同鋪面類型之模擬，透過實際量測鋪面熱通量作為設定參考，並以鋪面材質吸熱作為透水鋪面之假設，即熱通量設定為負值，而非透水鋪面則透過鋪面材質放熱，假設非透水鋪面反射太陽輻射情形，將其熱通量設定為正值。植栽類型之模擬，則是藉由 CFD 軟體中孔隙介質

(Porous Zone) 設定，假設不同樹種植栽。

(1) 計算場域與邊界條件設定

計算場域以水滄經貿園區之街道與開放空間為主，並因應不同街道尺度將其區分為 9 個區域進行模擬（詳圖 3）。模擬計算範圍入口，將其邊界條件設定為速度入口 (Velocity Inlet)，下游出口則設定為壓力出口 (Pressure Outlet)，地面之邊界條件設定為牆面 (Wall)，外部計算域則以對稱 (Symmetry) 條件設定，用以假設實際大氣之條件。

(2) 網格設定

網格系統設定是以有限體積法的數值計算法，網格可將欲計算區域區分為適當的格點，針對每格點質量、動量及能量條件進行運算。本研究透過軟體中 TGrid 網格劃分法，模擬都市中複雜之地形地貌，研究所模擬之 9 區域，其網格數依模擬範圍大小不等，介於 100 萬至 180 萬網格之間。

(3) 紊流模型

根據邱英浩及何育賢 (2008) 研究，當紊流模型設定為 Realizable $k-\epsilon$ 時， u/Ur (風速比) 之衰減趨勢與實測所得之趨勢較為接近，孔隙率之變化對風速影響較為明顯。故本研究之模擬邊界條件設定上，以 Realizable $k-\epsilon$ 紊流模型進行計算，可得較趨近於實際量測之結果。在 Realizable $k-\epsilon$ 模型中關於 k 和 ϵ 的運動方程如下：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{V \epsilon}} \quad (2)$$

其 $C_1 = \max \left[0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$ ， $\eta = S \frac{k}{\epsilon}$ ， $s = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ 與分別為平均速度梯度及浮力產生的紊流動能， Y_M 為在壓縮紊流中過度擴散產生的波動項， C_2 及 $C_{1\epsilon}$ 為常數， σ_k 及 σ_ϵ 為紊流動能方程式和紊流消散方程式的紊流 Prandtl 數。





圖 1 實際量測

表 2 實測結果

	草地 (透水)	植草磚 (不透水)	人行道鋪面 (不透水)	混凝土鋪面 (不透水)
heat flux min (W/m ²)	-157	19	429	392
heat flux max (W/m ²)	-46	122	598	460
風速(m/s)	1.8	1.2	1.8	1.8

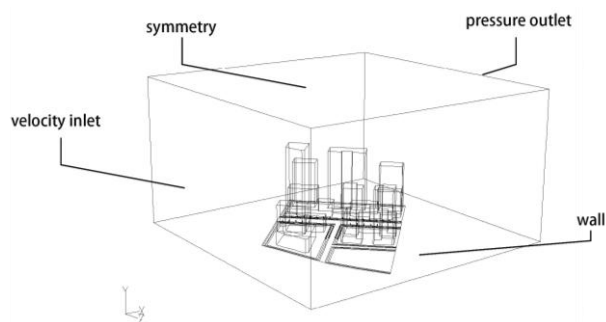


圖 2 邊界條件設定

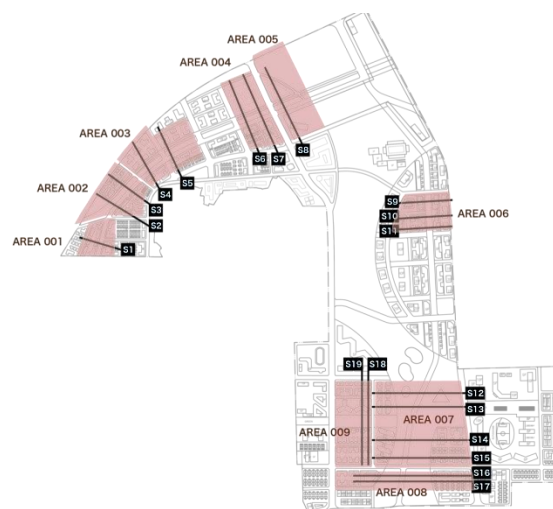


圖 3 模擬區域範圍及分區

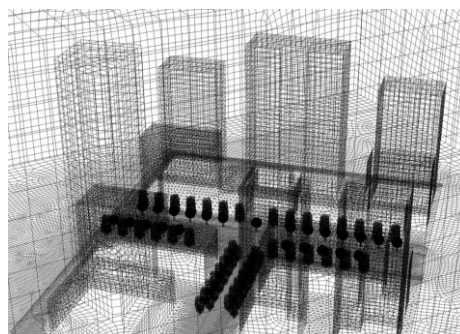


圖 4 CFD 網格

(4) 風梯度設定

由於空氣的流動會受到地形起伏、建築物等分布所產生之摩擦作用影響，使平均風速形成一垂直分佈之速度剖面，越近地表面則風速越小，一般稱為大氣邊界層或混合層，而平均風速的垂直風向分布可以指數或對數剖面表示（詳式3），式中u：高度z的風速， u_m ：等效高度風速，z：高度， α ：指數，K：風的高度因素。

$$\frac{u}{u_m} = Kz^\alpha \quad (3)$$

其中梯度高度與指數，需視地表的粗糙程度而定，本研究模擬之區域位於台中市中心，因此根據 British Standards Institution 所建議不同地況的邊界層高度與指數，將指數設為城市中心之 0.33 (BS 5925, 1991)。如上述公式及相關指數，本研究於進行風梯度之多項式如下圖5內公式4：

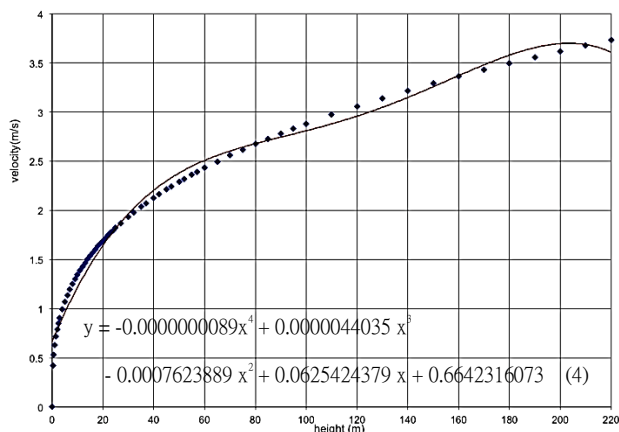


圖 5 風梯度 (wind profile) 圖

(5) 孔隙率參數設定

植栽會因樹冠的疏密度變化，影響植栽之遮風

效果。因此在數值模擬中，植栽之邊界條件以多孔介質來設定，將其假設為具均勻性且無彈性之多孔材質，在CFD計算中植栽孔隙率 (porosity) 設定的重要參數為慣性阻力係數 (C2) 及黏滯係數 ($1/\alpha$)，其關係式如下：

$$\alpha = \frac{D_p^2 P^3}{150 (1 - P)^2} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{3.5 (1 - P)}{D_p P} \quad (6)$$

式中 α 為滲透率，P為孔隙率 (porosity)， D_p 為顆粒孔徑大小， C_2 為慣性阻力係數。

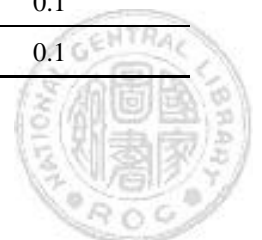
本研究依藉由式5及式6，分別設定3組孔隙率(P)為0.1、0.4、0.9之植栽模型，而孔隙介質中，孔徑大小在植栽模型裡可視為葉片大小，研究中將其假設為0.1m，其孔隙率相關數值參數詳表3，並將計算所得之結果，作為CFD邊界條件之設定。

(6) 模擬方案設定

鋪面熱通量可視為鋪面特性與土壤含水量之綜合結果，故本研究以鋪面熱通量假設蒸發散之強度，作為研究中鋪面透水與不透水之根據，分別針對透水鋪面、街道硬鋪面設定3組不同差值之熱通量，作為探討不同透水鋪面對街道熱環境之影響，透水鋪面之熱通量設定則是依實驗數據範圍中所選定，依據熱通量差，假設實際環境中鋪面吸放情形。而植栽的孔隙率設定，係假設植栽因季節變化所造成樹葉茂盛程度，透過孔隙率0.1、0.4、0.9不同程度之穿透效果及風衰程度模擬。藉由上述6組設定，分別進行鋪面及植栽對於戶外熱環境之影響研究（詳圖6）。

表 3 孔隙率參數設定

孔隙率(P)	滲透性(α)	黏滯係數($1/\alpha$)	慣性阻力係數(C2)	顆粒直徑(m)
0.1	8.23045×10^{-8}	12150000	31500	0.1
0.4	1.19×10^{-5}	84375	328.125	0.1
0.9	0.00486	205.7631	4.801097	0.1



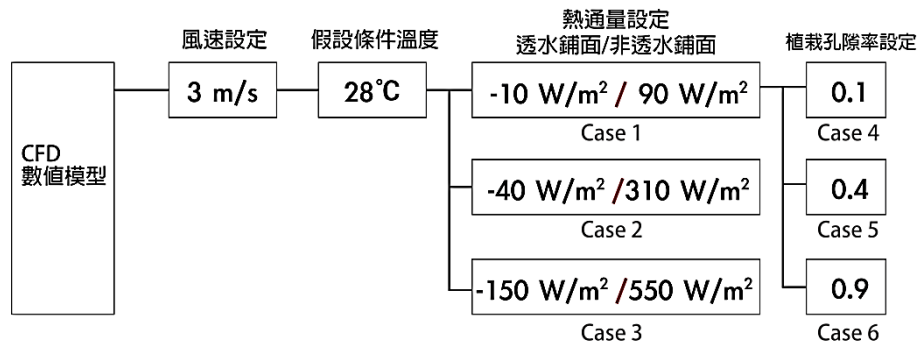


圖 6 模擬方案設定

三、數值模擬與分析

3.1 不同鋪面材質對熱環境之影響

(1) 區域 1 鋪面模擬

區域 1 鋪面類型如圖 7 所示，道路兩旁皆有人行道之設置，而人行道兩側設有透水鋪面 (P1-1、3、5、7)。本研究透過其鋪面設置之特色，將退縮綠帶、人行道及中央道路區分為不透水鋪面及透水，利用 3 組不同差距之熱通量設定: Case 1 (90 W/m^2 : -10 W/m^2)、Case 2 (310 W/m^2 : -40 W/m^2)、Case 3 (550 W/m^2 : -150 W/m^2) 比較，並於不同鋪面表面處設定觀測點，

作為不同鋪面形式對於熱環境影響之分析。

區域 1 之模擬結果 (詳表 4) 顯示，非透水鋪面之熱通量設定差距越大，溫度變化越大。如點 P1-4 (道路) 在熱通量條件相差 700 W/m^2 之 Case 3 (550 W/m^2 : -150 W/m^2) 時，溫度最大可達 48°C 。但透水鋪面之變化則相對較小，如 P1-1、P1-3、P1-5 與 P1-7 於 3 組設定下，溫度最大達 35°C 。透過圖 8 可知，道路於不同熱通量差異設定下，與基準溫度差最大可達 20°C ，溫度上升約 71%。而人行道於熱通量差 700 W/m^2 時，與基準溫度差 10°C ，溫度上升 35%。綠帶則較不受熱通量設定差異影響，其最大差值僅為 4°C ，溫度最多上升 14%。

表 4 區域 1 測點溫度

Case	區域 1 測點						
	P1-1	P1-2	P1-3	P1-4	P1-5	P1-6	P1-7
1	28°C	28°C	28°C	28°C	28°C	28°C	27°C
2	28°C	30°C	28°C	39°C	33°C	32°C	30°C
3	32°C	38°C	32°C	48°C	35°C	35°C	32°C

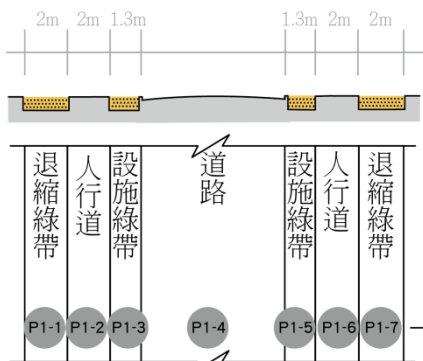


圖 7 區域 1 鋪面形式配置

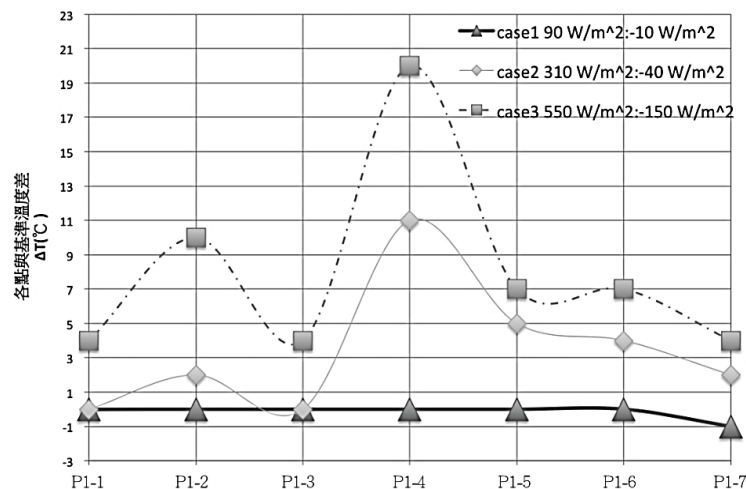


圖 8 區域 1 各測點與基準溫度差

(2) 區域 2 鋪面模擬

區域2鋪面類型詳圖9所示，街區設置為中央設有水圳，而水圳兩旁有綠帶及人行道。模擬將人行道（P2-2、4、8、11），與道路（P2-3、9）熱通量設定為正值，水圳（P2-6）及綠帶（P2-1、5、7、10、12）則設定為負值，藉由3組不同差距之熱通量設定模擬其街道熱環境。

區域2之模擬結果（詳表5）顯示，透水鋪面面積較小時，易受周邊鋪面溫度影響，如點P2-10（設施綠帶）在熱通量相差 $700\text{W}/\text{m}^2$ （Case3）時，鋪面溫度可達 75°C 。而其他透水鋪面之溫度變化則相對較小，如P2-1與P2-5，不因熱通量差改變而有較大溫度改變，其溫度最高僅 35°C 。詳圖10可知，道路（P2-9）於不同熱通量差異設定下，與基準溫度差最大可達 38°C ，溫度上升約135%。而人行道於熱通量差 $700\text{W}/\text{m}^2$ （Case3）時，與基準溫度差 22°C 。綠帶鄰近道路側之P2-10及P2-12外，則受熱通量設定差異影響較小，與基準溫度最大差值僅為 7°C 。

(3) 區域 3 鋪面模擬

區域3街區開放空間為中央水圳（P3-6）之設置，而水圳兩旁設有綠帶（P3-1、5、7、10、12）及人行道（P3-2、4、8、11）（詳圖11）。模擬將人行道與道路（P3-3、9）熱通量設定為正值，水圳及綠帶則設定為負值。

區域3之模擬結果（詳表6）顯示，就不同方案比較可知， ΔH 越大，溫度變化越大。如道路P3-3在鋪面熱通量設定相差 $700\text{W}/\text{m}^2$ （Case3）時，鋪面溫度最高可達 66°C 。而P3-3在Case1之設定時，鋪面溫度達 31°C 。但受建築物配置及周邊非透水鋪面影響，P3-1雖然為透水鋪面，但於不同差異之熱通量設置時，最高溫度差異仍可達 59°C （Case3）。詳圖12可知，道路於不同熱通量差異設定下，與基準溫度差最大可達 35°C ，溫度上升約125%。人行道於熱通量差 $700\text{W}/\text{m}^2$ （Case3）時，與基準溫度差 28°C ，溫度上升100%。而綠帶除了P3-1外，較不受熱通量設定差異影響，其與基準溫度最大差值僅為 15°C 。

表 5 區域 2 測點溫度

Case	區域 2 測點											
	P2-1	P2-2	P2-3	P2-4	P2-5	P2-6	P2-7	P2-8	P2-9	P2-10	P2-11	P2-12
1	27°C	27°C	28°C	27°C	27°C	34°C	27°C	27°C	31°C	28°C	31°C	28°C
2	30°C	30°C	32°C	30°C	32°C	30°C	30°C	32°C	53°C	35°C	35°C	35°C
3	33°C	33°C	33°C	35°C	35°C	30°C	33°C	35°C	65	75	50°C	48°C

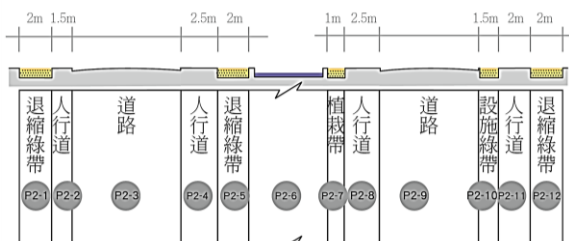


圖 9 區域 2 鋪面形式配置

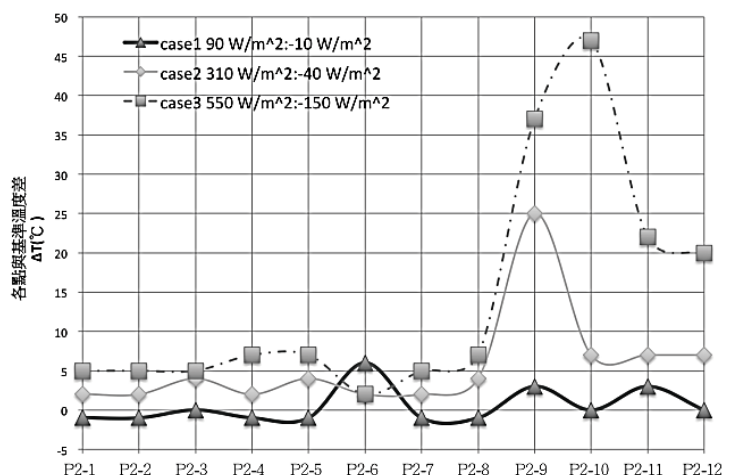


圖 10 區域 2 各測點與基準溫度差



表 6 區域 3 測點溫度

Case	區域 3 測點											
	P3-1	P3-2	P3-3	P3-4	P3-5	P3-6	P3-7	P3-8	P3-9	P3-10	P3-11	P3-12
1	31°C	31°C	31°C	31°C	26°C	26°C	27°C	28°C	28°C	28°C	27°C	28°C
2	33°C	33°C	31°C	29°C	29°C	28°C	34°C	34°C	41°C	37°C	32°C	34°C
3	59°C	59°C	66°C	47°C	41°C	27°C	33°C	41°C	43°C	37°C	39°C	33°C

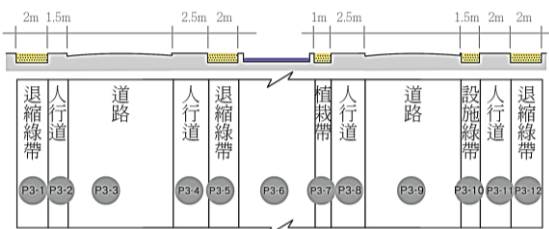


圖 11 區域 3 鋪面形式配置

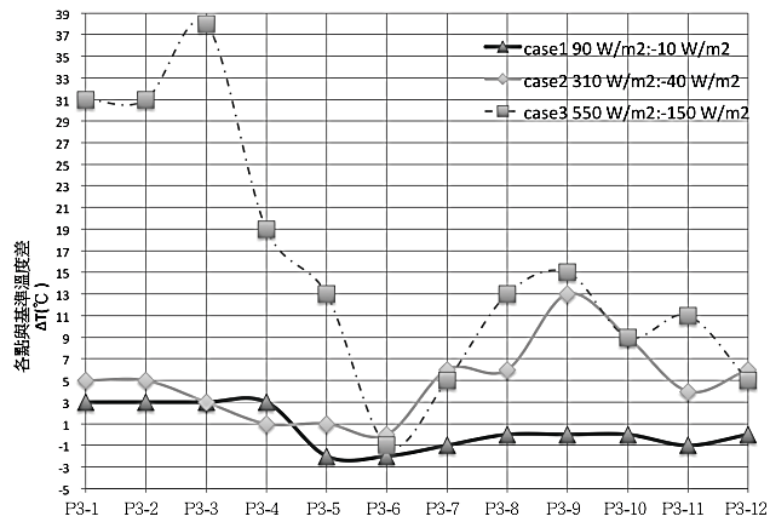


圖 12 區域 3 各測點與基準溫度差

(4) 區域 4 鋪面模擬

區域4詳圖13所示，其街區開放空間與區域2、3相似，為中央水圳之設置（P4-6），而水圳兩旁設有人行道（P3-2、4、8、11）及綠帶（P4-1、5、7、10、12）。模擬設定人行道與道路（P3-3、9、15、21）熱通量設定為正值，水圳及綠帶則設定為負值，透過3組不同差距之熱通量設定模擬其街道熱環境。

區域4之模擬結果（詳表7）顯示，鋪面除了受熱通量變化影響外，周邊建築對其散熱效果亦有顯著之影響。如建築物旁之透水鋪面P4-1在鋪面熱通量相差700W/m²（Case3）條件下，溫度可達34°C，溫度上升約21%。詳圖14可知，綠帶受熱通量差異設定影響較小，與基準溫度差僅6°C。道路（P4-9）於不同熱通量差異設定下，與基準溫度差最大可達8°C，溫度上升約38%。

(5) 區域 5 鋪面模擬

區域5街區開放空間亦為中央水圳（P5-6）之設

置，而水圳兩旁設有綠帶（P3-1、5、7、10、12）及人行道（P3-2、4、8、11）（詳圖15）。本研究將人行道與道路（P3-2、3、4、8、9、11）熱通量設定為正值，水圳及綠帶則設定為負值，並分別藉由3組不同差距之熱通量設定：90 W/m²：-10 W/m²（Case1）、310W/m²：-40 W/m²（Case2）、550 W/m²：-150W/m²（Case3），假設非透水鋪面與透水鋪面之蒸散效果。

區域5之透水鋪面在不同差距熱通量設定下，其鋪面溫度較不透水鋪面高，如建築物旁之透水鋪面點P5-1在條件相差700W/m²（Case3）時，溫度達35°C，結果顯示街道熱環境除了受鋪面形式影響外，建築配置亦為影響街道熱環境之重要因素之一。

詳圖16可知，除了P5-1及P5-12受周邊環境影響外（與基準溫度分別差7°C及8°C），綠帶受熱通量差異設定影響較小，與基準溫度最多差4°C，溫度變化最多達14%。道路及人行道除了P5-2受P5-1影響，與基準溫度差7°C，溫度變化達28%。其他測點於不同熱通量差異設定下，與基準溫度差最大為4°C。



表 7 區域 4 測點溫度

Case	區域 4 測點											
	P4-1	P3-2	P3-3	P3-4	P3-5	P3-6	P3-7	P3-8	P3-9	P3-10	P3-11	P3-12
1	30°C	31°C	31°C	31°C	26°C	26°C	27°C	28°C	28°C	28°C	27°C	28°C
2	31°C	33°C	31°C	29°C	29°C	28°C	34°C	34°C	41°C	37°C	32°C	34°C
3	34°C	59°C	66°C	47°C	41°C	27°C	33°C	41°C	43°C	37°C	39°C	33°C

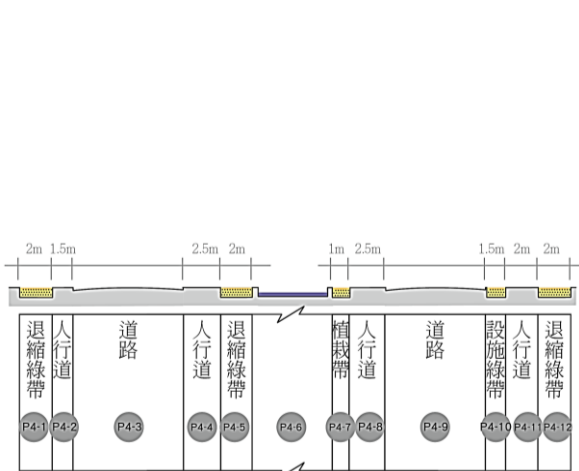


圖 13 區域 4 鋪面形式配置

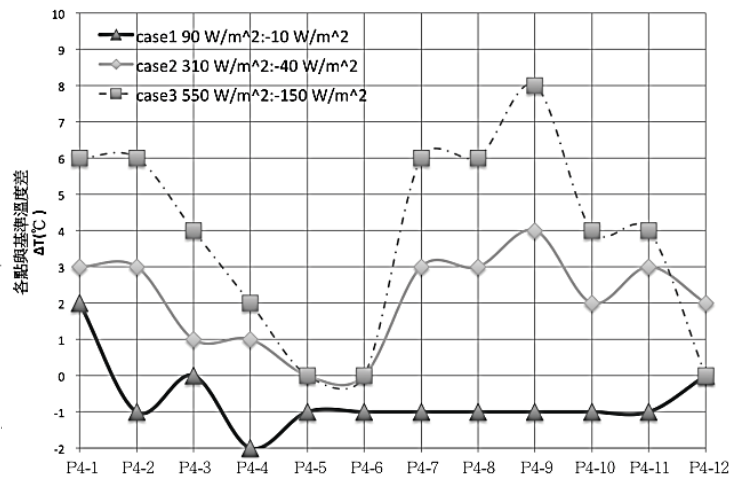


圖 14 區域 4 各測點與基準溫度差

表 8 區域 5 測點溫度

Case	區域 5 測點											
	P5-1	P5-2	P5-3	P5-4	P5-5	P5-6	P5-7	P5-8	P5-9	P5-10	P5-11	P5-12
1	28°C	28°C	28°C	28°C	27°C	27°C	27°C	27°C	28°C	27°C	27°C	27°C
2	31°C	32°C	31°C	29°C	29°C	30°C	30°C	29°C	31°C	29°C	29°C	29°C
3	35°C	35°C	32°C	30°C	30°C	32°C	32°C	32°C	32°C	30°C	30°C	36°C

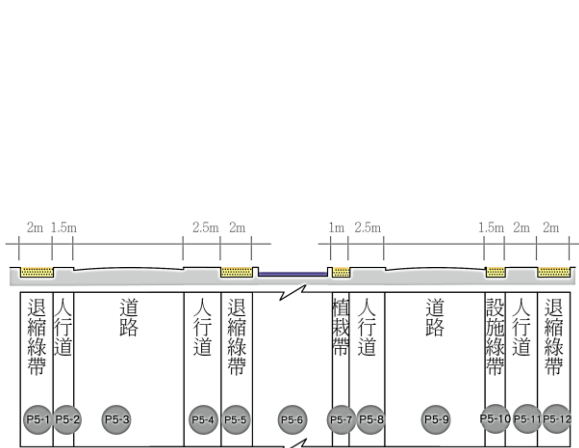


圖 15 區域 5 鋪面形式配置

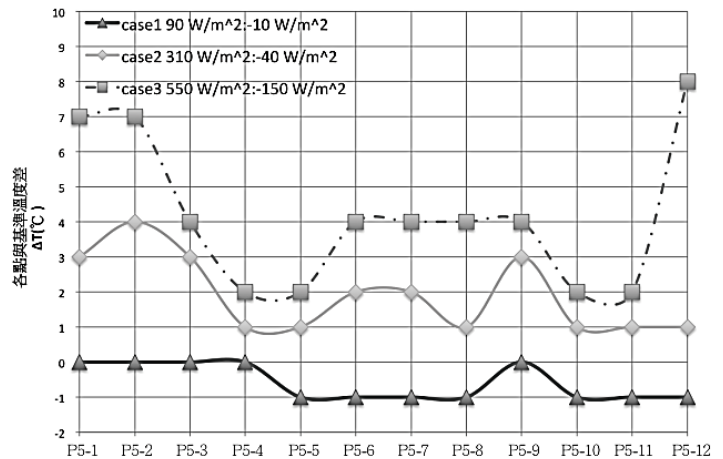


圖 16 區域 5 各測點與基準溫度差

(6) 區域 6 鋪面模擬

詳圖 17 可知區域 6 街區開放空間之設置為中央道

路 (P6-4) 兩旁設有綠帶 (P6-1、3、5、7) 及人行道 (P6-2、6)，而人行道與建築群間另設有一條植栽帶，模擬將人行道與道路之熱通量設定為正值，綠帶、草



溝則設定為負值。

模擬結果如表 9 所示，受風向影響，街道平行於盛行風方向時，道路 (P6-4) 鋪面溫度在不同熱通量影響下，最高達 35°C (Case3)，而人行道及綠帶溫度最高僅達 29°C。詳圖 18 可知，綠帶與人行道受熱通量差異設定影響較小，與基準溫度最多差 1°C，溫度變化僅 3%。而道路鋪面在 ΔH 為 700W/m²時，與基準溫度差為 7°C，溫度變化達 25%。

(7) 區域 7 鋪面模擬

區域7之配置詳圖19所示，其街區開放空間之設置為中央道路 (P7-3) 兩旁設有綠帶 (P7-2、4) 及人行道 (P7-1、5)，而研究透過人行道與道路熱通量設定為正值，綠帶則設定為負值，模擬不同熱通量設定下鋪面類型對於街道熱環境之影響。

模擬結果 (詳表 10) 顯示，點 P7-1 (人行道) 與 P7-3 (道路) 在不同熱通量設定下，溫度最高達 32°C，而鄰近之綠帶 (P7-2)，在其影響下溫度最高達 30°C。詳圖 20 可知，除了 P7-1 受周邊環境影響外 (與基準溫度最大分別差 4°C)，綠帶與人行道受熱通量差異設定影響較小，與基準溫度差異皆在 3°C 以下。而道路鋪面在 ΔH 設定為 700W/m²時，與基準溫度差 4°C，溫度差異約 14%。

(8) 區域 8 鋪面模擬

區域 8 街道配置詳圖 21，街區開放空間之設置為中央道路 (P8-3) 兩旁設有生態溝 (P8-2、4) 及人行道 (P8-1、5)。模擬中，將人行道與道路熱通量設定為正值，綠帶則設定為負值。分別藉由 3 組不同差距之熱通量設定: 90 W/m² : -10 W/m² (Case1)、310W/m² : -40 W/m² (Case2)、550 W/m² : -150W/m² (Case3)，假設非透水鋪面與透水鋪面之蒸散效果。

模擬結果 (詳表11) 顯示，相同風速不同差距之熱通量之條件下，本區因街道方向以及建築物配置較為開闊的關係，使溫度至多達 34°C (P8-4)，相較於其他區域之溫度變化小。而溫度最低則為 P8-1 (人行道)，其鋪面溫度為 26°C。如圖 22 所示，其中以 P8-4 (綠帶)

及 P8-5 (人行道) 溫度差距最大，不同熱通量設定下，溫度差最多達 6°C，溫度變化約 21%。

(9) 區域 9 鋪面模擬

區域 9 街道配置詳圖 23 所示，街區開放空間之設置為中央道路兩旁設人行道 (P9-3)，人行道 (P9-2、4) 與建築線中間隔有退縮綠帶 (P9-1、5)。其熱通量之設定為，人行道與道路熱通量設定為正值，綠帶則設定為負值。

模擬結果 (詳表12) 顯示，在熱通量設定條件為相差 700W/m²下，P9-3 (道路) 溫度最高達 44°C，而綠帶受道路溫度上升影響，其鋪面溫度明顯高於人行道，最高達 32°C。詳圖 24 可知，道路與基準溫度最多差 16°C，溫度變化約 57%。而人行道鋪面受不同熱通量設定影響較小，與基準溫度最多差 1°C，溫度變化約 13%。

(10) 綜合討論

藉由 3 組 ΔH 設定透水與非透水鋪面，模擬不同 ΔH 下 3 組街道熱環境可知，當熱通量差較小 (-10 W/m² 與 90 W/m²)，透水鋪面與非透水鋪面溫度差異較小，溫度與基準溫度差最大僅 6°C (P2-5)，溫度變化約 21%。當 ΔH 為 -40 W/m² 與 310 W/m² 時，透水鋪面與非透水鋪面溫度與基準溫度差最大為 25°C (P2-9)，溫度上升 89%。而 ΔH 為 -150 W/m² 與 550 W/m² 時，透水鋪面與非透水鋪面溫度與基準溫度差最大為 47°C (P2-10)，溫度上升 167%。由此可知 ΔH 設定越大時，鋪面溫度差異越大。此外，由不同區域之模擬可知，街道熱環境受風向影響，當風向垂直於街道方向，各類型鋪面散熱效果較差。如模擬中區域 1 至 6 為垂直街道之風向設定，其透水鋪面溫度最高達 75°C，溫度上升 167%。非透水鋪面溫度最高達 66°C，溫度上升 135%。平行於街道之風向設定，其透水鋪面溫度最高達 34°C (P8-4)，溫度上升 21%。非透水鋪面溫度最高達 44°C (P9-3)，溫度上升 57%。



表 9 區域 6 測點溫度

Case	區域 6 測點						
	P6-1	P6-2	P6-3	P6-4	P6-5	P6-6	P6-7
1	28°C	28°C	28°C	30°C	29°C	29°C	28°C
2	27°C	28°C	28°C	30°C	28°C	28°C	27°C
3	28°C	28°C	28°C	35°C	28°C	28°C	28°C

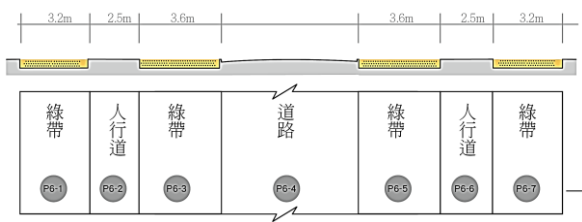


圖 17 區域 6 鋪面形式配置

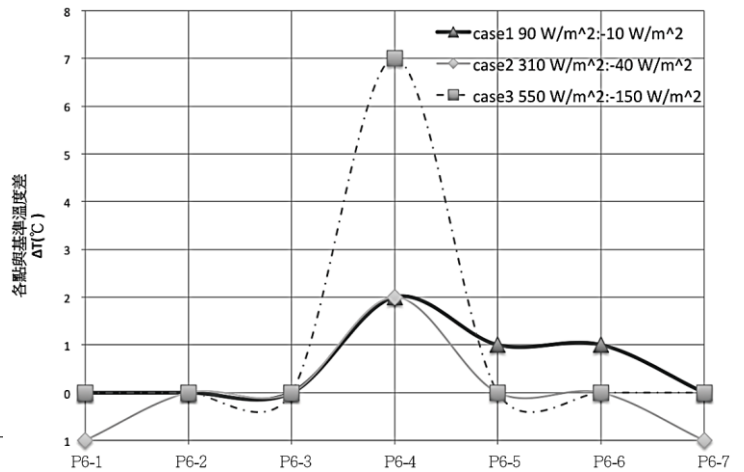


圖 18 區域 6 各測點與基準溫度差

表 10 區域 7 測點溫度

Case	區域 7 測點				
	P7-1	P7-2	P7-3	P7-4	P7-5
1	28°C	28°C	29°C	28°C	28°C
2	31°C	30°C	31°C	31°C	29°C
3	32°C	30°C	32°C	29°C	31°C

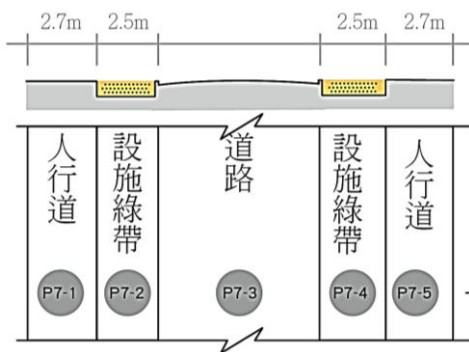


圖 15 區域 5 鋪面形式配置

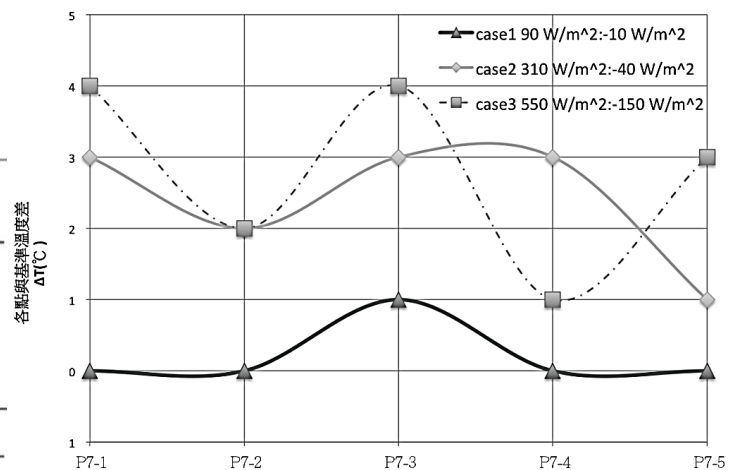


圖 20 區域 7 各測點與基準溫度差



表 11 區域 8 測點溫度

Case	區域 8 測點				
	P8-1	P8-2	P8-3	P8-4	P8-5
1	28°C	28°C	28°C	28°C	28°C
2	28°C	29°C	30°C	31°C	31°C
3	26°C	28°C	32°C	34°C	34°C

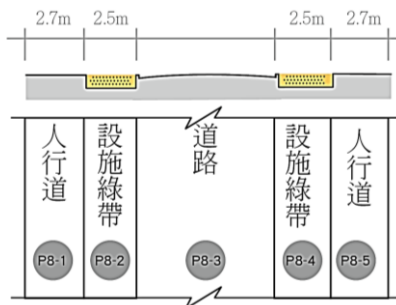


圖 21 區域 8 鋪面形式配置

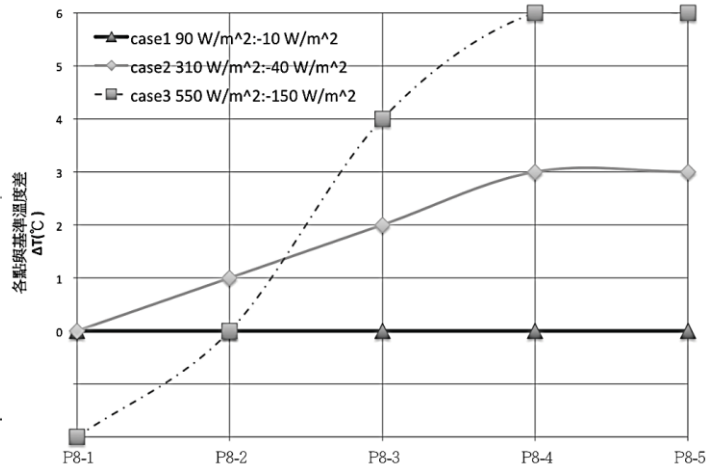


圖 22 區域 8 各測點與基準溫度差

表 12 區域 9 測點溫度

Case	區域 9 測點				
	P9-1	P9-2	P9-3	P9-4	P9-5
1	29°C	30°C	31°C	29°C	28°C
2	28°C	31°C	37°C	30°C	29°C
3	27°C	32°C	44°C	32°C	29°C

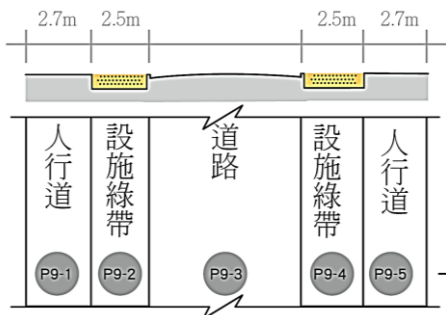


圖 23 區域 9 鋪面形式配置

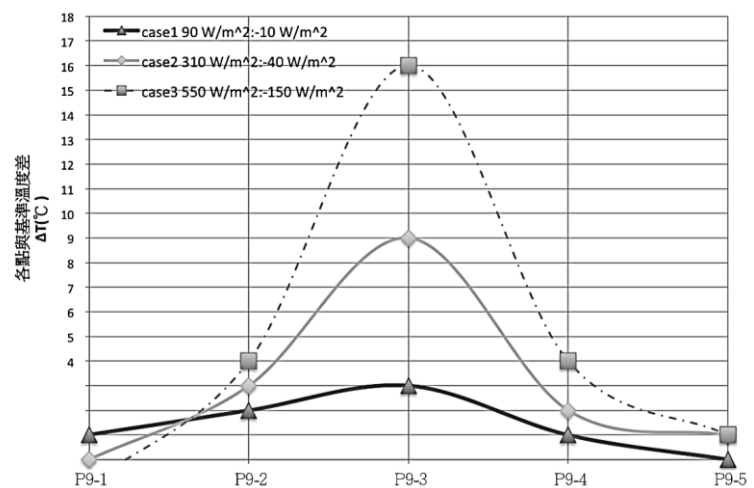


圖 24 區域 9 各測點與基準溫度差

3.2 不同植栽孔隙率設定對鋪面溫度之影響

透過不同植栽孔隙率之設定，假定不同樹種孔隙率對於街道開放空間之微氣候影響。藉由模擬設有植栽帶之區域1至6，以區域中植栽帶與兩旁之道路及人行道鋪面溫度模擬(圖25)，探討其溫度差異及孔隙率設定之關係，而孔隙率則分別設定為0.1、0.4及0.9(孔隙率之參數設定詳表3)，為本項模擬之變因。

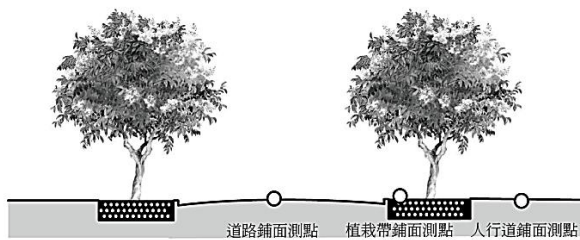


圖 25 植栽孔隙率模擬測點分佈

(1) 區域 1 植栽模擬

區域1之植栽模擬詳圖26，圖中x軸分別代表道路、喬木植栽帶及人行道，透過模擬可知，喬木植栽帶之鋪面溫度在不同孔隙率設定下，溫度差為1°C，分別低於基準溫度4°C及5°C。道路硬鋪面則較基準溫度上升2°C，而人行道路之鋪面溫度則不受孔隙率設定影響。其中喬木植栽帶與道路於孔隙率設定為0.4及0.9時，測得溫度皆為低於基準溫度1°C。

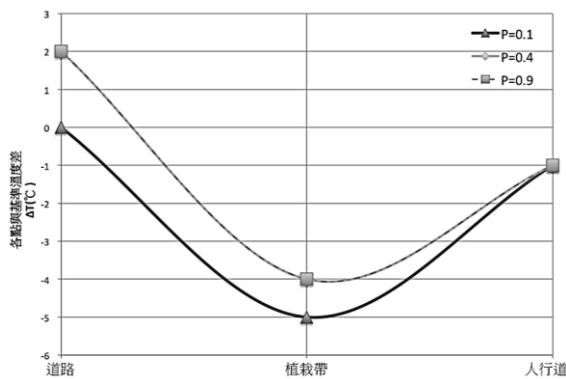


圖 26 區域1 植栽模擬各測點與基準溫度差

(2) 區域 2 植栽模擬

區域 2 之植栽模擬詳圖 27，喬木植栽帶之鋪面溫度在不同孔隙率設定下，最大較基準溫度低 7°C。道路硬鋪面則最多上升 6°C，人行道路鋪面溫度則不

受孔隙率設定影響。其中喬木植栽帶於孔隙率設定為 0.4 及 0.9 時，測得溫度皆為低於基準溫度 6°C。而道路鋪面於孔隙率設定為 0.1，鋪面溫度與基準溫度差 3°C，孔隙率設定 0.4 時，鋪面溫度與基準溫度差 4°C，而孔隙率設定 0.9 時，鋪面溫度與基準溫度差 6°C。

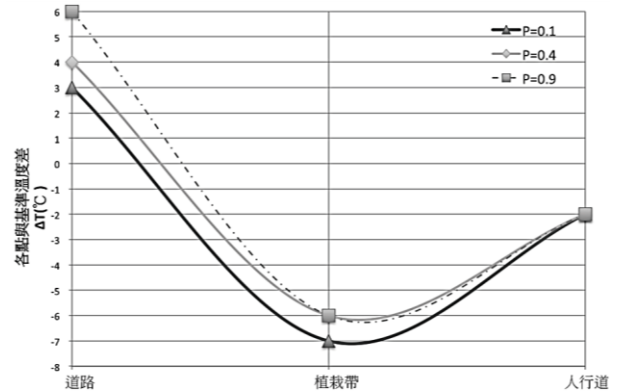


圖 27 區域2 植栽模擬各測點與基準溫度差

(3) 區域 3 植栽模擬

區域3之植栽模擬如圖28，在不同孔隙率設定下，喬木植栽帶之鋪面溫度較基準溫度最多低6°C，道路硬鋪面及人行道路之鋪面溫度則不受孔隙率設定影響，其與基準溫度差皆為3°C及-1°C。其中喬木植栽帶於孔隙率設定為0.4及0.9時，測得溫度差皆同為-5°C，孔隙率設定為0.1時，測得溫度差為-6°C。

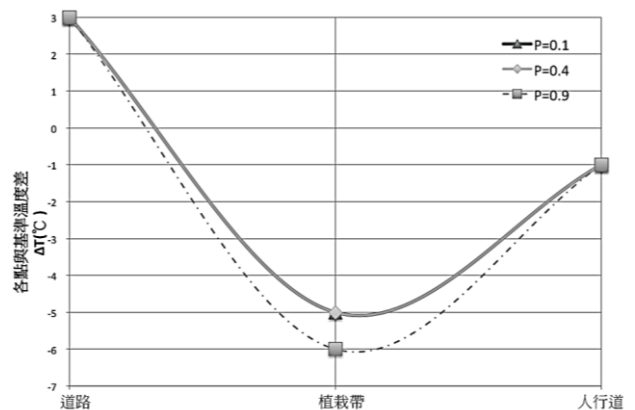


圖 28 區域3 植栽模擬各測點與基準溫度差

(4) 區域 4 植栽模擬

區域 4 之植栽模擬如圖 29，喬木植栽帶與人行道之鋪面溫度在不同孔隙率設定下，溫度差皆相同，



與基準溫度差分別-4°C及-2°C。而道路硬鋪面於不同孔隙率設定下則可差異 1°C，其中孔隙率設定為 0.1 及 0.4 時，測得溫度差皆同為 1°C。而道路鋪面於孔隙率設定為 0.9，鋪面溫度與基準溫度差質為 0°C。

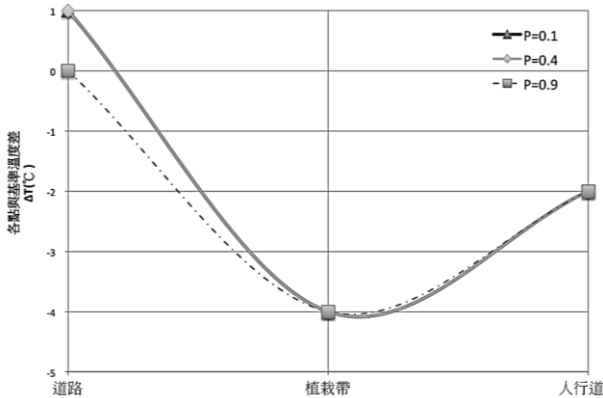


圖29 區域4 植栽模擬各測點與基準溫度差

帶於孔隙率設定為0.4及0.9時，測得溫度差皆同為-3°C，而孔隙率設定為0.1，其溫度與基準溫度差為-4°C。道路孔隙率設定0.4及0.9時，鋪面溫度與基準溫度差1°C，而孔隙率設定0.1時，鋪面溫度與基準溫度相同。

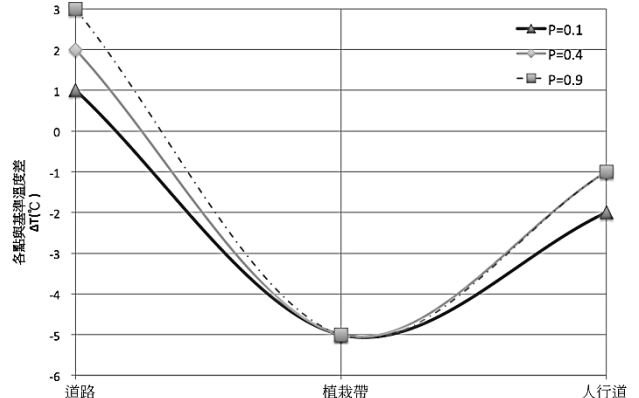


圖31 區域6 植栽模擬各測點與基準溫度差

(5) 區域 5 植栽模擬

區域 5 之植栽模擬詳圖 30，在不同孔隙率設定下，喬木植栽帶鋪面溫度差為不變，皆為-5°C。道路硬鋪面及人行道路之鋪面溫度則受孔隙率設定影響有所差異，其中道路鋪面於孔隙率設定為 0.1、0.4 及 0.9 時，與基準溫度差分別為 1°C、2°C 及 3°C，而人行道路之鋪面溫度於 0.4、0.9 時，其與基準溫度差皆為-1°C，而孔隙率為 0.1 之設定，溫度差為-2°C。

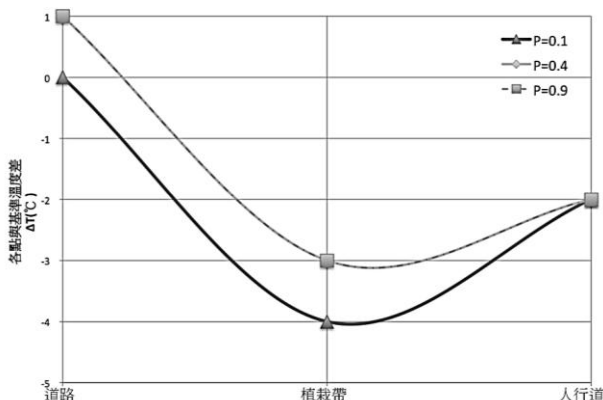


圖30 區域5 植栽模擬各測點與基準溫度差

(6) 區域 6 植栽模擬

區域6之植栽模擬詳圖31，人行道路之鋪面溫度在不同孔隙率設定下，與基準溫度差皆為-2°C。而喬木植栽

(7) 綜合討論

不同植栽孔隙率設定下，孔隙率越大（葉面密度較小），周邊鋪面受植栽帶及鋪面熱通量設定影響，其鋪面溫度越高。如區域 2 植栽孔隙率為 0.9 時，不透水鋪面（道路）與基準溫度差最多為 6°C，植栽孔隙率為 0.1 時，不透水鋪面（道路）與基準溫度差僅為 3°C。區域 6 植栽孔隙率為 0.9 時，不透水鋪面（道路）與基準溫度差最多為 3°C，植栽孔隙率為 0.1 時，不透水鋪面（道路）與基準溫度差僅為 1°C。次外，綜合 6 個區域比較可知，道路鋪面受植栽孔隙影響較大。在不同孔隙率方案比較下，最大差距可達 3°C。而植栽帶及人行道，在不同孔隙率設定下，最大差異僅為 1°C。

四、結論

本研究以設定不同鋪面之熱通量條件以及植栽孔隙率進行研究，藉由熱通量之吸熱與放熱模擬透水鋪面與不透水鋪面，以及植栽葉面密度對於街道熱環境之影響研究。研究藉由實際量測數值驗證 CFD 之數學假設，並調整 CFD 模型進行不同鋪面類型與植栽葉面密度之變因分析，作為探討透水鋪以及植栽對於街道熱環境之影響研究。經過數值模擬之成果，整

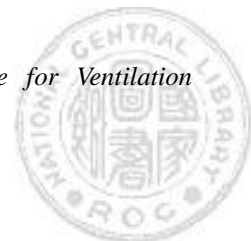
理下列結論：

- (1) 藉由 3 種熱通量差 (ΔH) 分別假設透水與非透水鋪面，模擬不同 ΔH 下： -10 W/m^2 與 90 W/m^2 (Case1)、 -40 W/m^2 與 -310 W/m^2 (Case2)、 -150 W/m^2 與 550 W/m^2 (Case3) 共 3 組街道熱環境可知，當 ΔH 較小 (100 W/m^2)，透水鋪面與非透水鋪面溫度差異較小，溫度與基準溫度差最大僅 6°C ，溫度變化約 21%。當 ΔH 為 -350 W/m^2 時，透水鋪面與非透水鋪面溫度與基準溫度差最大為 25°C ，溫度上升 89%。而 ΔH 為 700 W/m^2 時，透水鋪面與非透水鋪面溫度與基準溫度差最大為 47°C ，溫度上升 177%。由此可知熱通量設定差距越大時，鋪面溫度差異越大。
- (2) 受街道配置與周邊環境影響，透水鋪面出現溫度高於非透水鋪面之情形。如 P5-12 為綠帶設定，測得溫度為 36°C ，而同區域中非透水鋪面溫度最高僅 35°C (P5-2)；P2-5 透水鋪面溫度為 75°C ，同區域中非透水鋪面溫度最高僅 65°C 。透過其設置位置可知，溫度較高之透水鋪面，皆位於街道的最外側，鄰建築物周邊。由此可見，鋪面溫度易受周邊環境及街道配置影響。
- (3) 街道熱環境受風向影響，當風向垂直於街道方向，各類型鋪面散熱效果較差。如模擬中區域 1 至 6 為垂直街道之風向設定，透水鋪面溫度最高達 75°C ，溫度上升 177%。非透水鋪面溫度最高達 66°C ，溫度上升 135%。而平行於街道之風向設定，透水鋪面溫度最高達 34°C ，溫度上升 21%。非透水鋪面溫度最高達 44°C ，溫度上升 57%。
- (4) 不同植栽孔隙率設定下，孔隙率越大（葉面密度較小），鋪面溫度越高。如區域 2 植栽孔隙率為 0.9 時，不透水鋪面（道路）與基準溫度差最多為 6°C ，植栽孔隙率為 0.1 時，不透水鋪面（道路）與基準溫度差僅為 3°C 。綜合 6 個區域比較可知，道路鋪面受植栽孔隙影響較大。在不同孔隙率方案比較下，最大差距可達 3°C 。

而植栽帶及人行道，在不同孔隙率設定下，最大差異僅為 1°C 。

參考文獻

- 吳黛岑 (2007)。集合住宅中庭植栽微氣候之數值模擬研究。未出版之碩士論文。國立成功大學建築學系，臺南市。
- 林子平，何友鋒，楊鴻銘 (2005)。都市地表不透水率之預估與分析：以台中市為例。《都市與計劃》，32 (3)，333-354。
- 林子平，林憲德，李仁豪 (2001)。台南市都市環境透水性實測解析。《都市與計劃》，28 (2)，211-235。
- 林炯明 (2010)。都市熱島效應之影響及其環境意涵。《環境與生態學報》，3 (1)，1-15。
- 林憲德 (1999)。《城鄉生態》。台北市：詹氏書局。
- 林憲德，陳冠廷，郭曉青 (2001)。台灣中型都市熱島現象與土地利用之觀測解析。《規劃學報》，28，47-64。
- 林優陸 (2009)。減緩都市熱島之數值模擬研究。未出版之碩士論文。國立台北科技大學冷凍空調工程系，台北市。
- 邱英浩 (2012)。透水面積比例對環境微氣候之影響：以中興新村南核心區為例。《都市與計畫》，39 (3)，297-326。
- 邱英浩，何育賢 (2008)。植栽配置與孔隙率對環境風場之影響-CFD 模擬。2008 聯合年會 (中華民國都市計劃學會、區域科學學會、地區發展學會) 暨論文研討會論文集。台北市：光碟論文集。
- 孫振義，林憲德 (2006)。台南地區都市熱島強度全年變動之研究。《都市與計劃》，33 (1)，51-68。
- 孫振義，林憲德，呂昺銘，劉正千，陳瑞鈴 (2010)。台南市地表溫度與地表覆蓋關係之研究。《都市與計劃》，37 (3)，369-391。
- 陳滢世，巫嘉綺 (2011)。台南市公園綠地植栽與鋪面型態之溫熱環境—紅外線測溫熱像分析。《環境與生態學報》，4 (2)，3-20。
- BS 5925 (1991)。Code of Practice for Ventilation



- Principles and Design for Natural Ventilation*. London, UK: British Standards Institution.
- London, UK: British Standards Institution.
- Ichinose, T., Shimodozono, K., & Hanaki, K. (1999). Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment*, 33(24-25), 3897-3909.
- Landsberg, H. E. (1981). *The Urban Climate*. NY, USA: Academic Press.
- Lin, T. P., Ho, Y. F., & Huang, Y. S. (2007). Seasonal effect of pavement on outdoor thermal environments in subtropical Taiwan. *Building and Environment*, 42(12), 4124-4131.
- Lin, T. P., Matzarakis, A., & Hwang, R. L. (2010). Effect of pavements albedo on long-term outdoor thermal comfort. *Proceedings of BIOMET 7 Conference*. Freiburg, Germany: DMG.
- Prado, R. T. A., & Ferreira, F. L. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37(4), 295-300.
- Robitu, M., Musy, M., Inard, C., & Groleau, D. (2006). Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy*, 80(4), 435-447.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2), 99-103.
- Takahashi, K., Yoshida, H., Tanaka, Y., Aotake, N., & Wang, F. (2004). Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation. *Energy and Buildings*, 36, 771-779.
- Wong, N. H., & Yu, C. (2005). Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*, 29(3), 547-558.
- London, UK: British Standards Institution.
- Chen, Y. S., & Wu, C. C. (2011). The thermal environment at the planting and pavement of a urban park in Tainan--Analyze with infrared measurement. *Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 4(2), 3-20.
- Chiu, Y. H. (2012). The effects of environmental micro-climates due to the area of pervious pavement in the southern zone of the Jhong Sing Village. *City and Planning*, 39(3), 297-326.
- Chiu, Y. H., & Ho, Y. H. (2008). An investigation into layouts and porosity of trees on the effects of wind environment by field measurement and CFD method. *Collected Papers of 2008 Joint Annual Conference (Taiwan Institute of Urban Planning, Chinese Regional Science Association-Taiwan, Association of Glocal Development) and Thesis Seminars*. Taipei: Collected papers CD.
- Ichinose, T., Shimodozono, K., & Hanaki, K. (1999). Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment*, 33(24-25), 3897-3909.
- Landsberg, H. E. (1981). *The Urban Climate*. NY, USA: Academic Press.
- Lin, C. M. (2010). The influence and environmental meaning of urban heat island effect. *Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 3(1), 1-15.
- Lin, H. T. (1999). *Ecology in Urban and Rural Areas*. Taipei: CHAN'S ARCH-PUBLISHING CO., LTD.
- Lin, H. T., Chen, K. T., & Kuo, H. C. (2001). Experimental analyses on the urban heat island effect for the middle scale cities in Taiwan. *Journal of Planning*, 28, 47-64.
- Lin, T. P., Ho, Y. F., & Huang, Y. S. (2007). Seasonal effect of pavement on outdoor thermal environments in subtropical Taiwan. *Building and Environment*, 42(12), 4124-4131.

REFERENCES in English

BS 5925 (1991). *Code of Practice for Ventilation Principles and Design for Natural Ventilation*.



- Lin, T. P., Ho, Y. F., & Yang, H. M. (2005). Prediction and analysis of percentage of impervious area in Taichung City. *City and Planning*, 32(3), 333-354.
- Lin, T. P., Lin, H. T., & Li, J. H. (2001). Investigation and analysis on the performance of permeability in urban environment of Taiwan City. *City and Planning*, 28(2), 211-235.
- Lin, T. P., Matzarakis, A., & Hwang, R. L. (2010). Effect of pavements albedo on long-term outdoor thermal comfort. *Proceedings of BIOMET 7 Conference*. Freiburg, Germany: DMG.
- Lin, Y. L. (2009). *Numerical Simulation of the Urban Heat Island Mitigation*. Unpublished master's thesis. Department of Energy and Refrigerating Air-Conditioning Engineering, NTUT, Taipei.
- Prado, R. T. A., & Ferreira, F. L. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37(4), 295-300.
- Robitu, M., Musy, M., Inard, C., & Groleau, D. (2006). Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy*, 80(4), 435-447.
- Sun, C. Y., & Lin, H. T. (2006). Annual variation of urban heat island intensity in the Tainan region. *City and Planning*, 33(1), 51-68.
- Sun, C. Y., Lin, H. T., Lu, K. M., Liu, C. C., & Cheng, R. L. (2010). Relationship between surface temperature and land-cover in Tainan City. *City and Planning*, 37(3), 369-391.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2), 99-103.
- Takahashi, K., Yoshida, H., Tanaka, Y., Aotake, N., & Wang, F. (2004). Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation. *Energy and Buildings*, 36, 771-779.
- Wong, N. H., & Yu, C. (2005). Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*, 29(3), 547-558.
- Wu, T. T. (2007). *A Study of the Numerical Simulation on Urban Microclimate- The Influence of Vegetation in the Open Space of Condominiums*. Unpublished master's thesis. Department of Architecture, National Cheng Kung University, Tainan.

