

台灣氣候下室內調濕建材之適用性探討

蔡耀賢* 江哲銘**

關鍵字：室內空氣品質，數值解析，調濕效果，熱與濕氣同時移動

摘要

台灣位於亞熱帶氣候區，台北、台中、高雄等都市之年平均相對濕度均在 75%以上，室內的高濕度環境提供室內建材表面之黴菌等微生物的良好生長條件，間接造成室內空氣的生物性污染，對室內人員的健康造成威脅。許多國外研究指出利用多孔質建材的調濕效果可以減少室內濕度的變動幅度以改善濕氣的相關問題。然而，台灣的相對濕度變動常在高濕度範圍，緩和變動幅度並非有效對策，而是需要積極除濕。本研究採用平均氣象年資料進行解析，同時評估木地板的調濕效果對室內人員健康（生物性污染之風險）與耗能（空調熱負荷）之影響，進而利用改變日夜間換氣量手法以增加建材之調濕效果，提出符合各地氣候與建築物型態之使用方式。結果顯示台北、台中與高雄氣候下最爲健康且節能之換氣量策略均不同，台北以 TP1、台中以 TC3、高雄則以 KA4 爲最佳換氣策略。可見室內調濕建材設置時的換氣策略應隨當地氣候而調整，方能得到最佳的效果。

Study on the Applicability of Moisture Buffering Materials in Taiwan

Y. S. Tsay* C. M. Chiang**

KEYWORDS: Indoor Air Quality, Numerical Simulation, Moisture Buffering Effect, Heat and Vapor Transport

ABSTRACT

Taiwan is located in a sub-tropical climatic region. The annual mean air relative humidity is over 75% in Taipei, Taichung and Kaohsiung. This hot and humid climate provides an appropriate habitat for microbes such as fungi and mold, and dampness in buildings leads to significant microbial pollution and damage. A moisture buffering effect that provides passive moisture control by using porous interior materials was proposed as an effective way to alleviate such dampness problems. In this paper, a numerical simulation including heat/moisture transportation inside the interior materials was carried out, and an efficient way of using moisture buffering materials was evaluated in Taipei, Taichung and Kaohsiung.

* 雲林科技大學創意生活設計系助理教授(通訊作者 Email: tsayys@yuntech.edu.tw)

Assistant Professor, Department of Creative Design, National Yunlin University of Science and Technology, Taiwan

**國立成功大學建築系教授

Professor, Department of Architecture, National Cheng-Kung University, Taiwan

一、研究背景與目的

近年在歐美等國家，因室內濕氣所造成的問題漸漸受到世人的重視。過高的室內濕氣，除了會造成建材的腐朽與破壞 (Andrade, et al., 1999) 之外，亦促進室內的黴菌、塵蟎 (house dust mite) 等生物性污染，間接造居住者呼吸器疾病、氣喘、過敏、疲勞與頭痛等健康上的問題 (Bornehag, et al., 2004)；反之，過低的濕度除了使室內人員產生乾燥感而感到不舒適之外，亦提供流行性感冒病毒 (influenza virus) 較佳的生長環境 (Harper, 1961)。因此，許多先進國家的室內空氣品質基準中，均將相對濕度列為管制項目，如日本厚生勞動省的建議值為 40~70%，加拿大保健省為夏季 30~80% 及冬季 30~55%，與台灣同為熱濕氣候的新加坡則為 70% 以下 (池田耕一等人，2005)。

台灣位於亞熱帶氣候區，扣除高山地區之後各地年平均相對濕度均在 75% 以上，而各個月份之平均相對濕度亦在 70% 以上 (中央氣象局，1971~2000)。文獻指出台灣地區在夏季時，空戶室內真菌濃度高於美國、芬蘭等國家 (Wu, et al., 2000)，顯示台灣氣候較適合真菌的生長。而室內黴菌污染的主要來源則為室內建材及空調機，其中又以室內建材表面為主要來源 (紀碧芳，2003)。可見台灣高溫多濕氣候下室內生物性污染問題是相當重要的課題。

利用多孔質建材的吸放濕效果來調整濕度的手法一般稱為調濕效果或濕氣緩和效果 (moisture buffering effect)，是改善濕氣環境的誘導性控制 (passive control) 方式，在國外有許多研究指出這種手法可以減少室內濕度的變動幅度，減少高濕度與低濕度之出現頻率，不但可有效改善上述之濕氣問題，更可減少除濕與加濕所需之耗能。

然而，相關研究多以歐洲溫帶與寒帶國家氣候為探討對象，對持續高濕度環境下的研究則相當少。當氣候屬於熱帶、亞熱帶的持續高濕度環境時，單純減少變動幅度的緩和並無法有效解決濕氣問題，而是需要積極除濕，將相對濕度的變動整體降低。但目前針對熱帶、亞熱帶氣候下之目前相關研究仍然相當少，針對位處高溫多濕氣候下的台灣，尚未有研究能夠提出兼顧健康與耗能的有效濕氣對策，並提出量化的評估方法。

本論文的研究目的如下：

- (1) 探討國內外文獻針對氣候與調濕建材使用效果之研究，並提出台灣高溫多濕氣候下使用調濕建材時之有效方法。
- (2) 以建材孔隙率、平衡含水率等測定實驗建立建材之濕氣物性資料，用以進行使用調濕建材室內空間之數值解析。
- (3) 以不同換氣手法進行住宅單室之解析，提出台北、台中與高雄氣候下同時兼顧健康與節能之調濕建材使用手法。

二、相關研究文獻回顧

2-1 室內微生物生長環境的評估

室內的高濕度環境是塵蟎與黴菌等微生物適於生長的環境。塵蟎的代謝物與黴菌孢子除了引起氣喘等過敏性疾病外，Wessén 等研究者 (1996) 發現細菌與黴菌等微生物由來的揮發性有機化合

物，稱為 MVOC (Microbial Volatile Organic Compounds)，雖然仍有許多研究在探討這些毒素對人體健康的危害，但已有許多研究指出 MVOC 是造成過敏、感染性疾病、中毒症狀，甚至導致癌症之原因 (Leino, et al., 2003) (Fischera, et al., 2000)。黴菌的生長需適當的溫濕度及養分。Clarkea 等研究者 (1999) 以 6 種好乾性與好濕性黴菌的培養實驗探討提出各種黴菌的生長溫濕度下限，發現在室內溫度在 15~30°C 範圍時，相對濕度超過 75% 便適於好乾性黴菌的生育，而超過 85% 時便適於好濕性黴菌的生長；Abe (1996) 以好乾性黴菌 *Eurotium herbariorum* 的菌絲成長環境為基準提出了黴菌指數 (fungal index)，可藉由環境之溫度與相對濕度來評估黴菌生長的可能性。同樣指出在 15~30°C 範圍時，相對濕度超過 75% 時便可能造成黴菌之生長，且相對濕度越高則黴菌指數越高。柳宇等研究者 (2007) 以黴菌感測器 (fungal sensor) 進行空調機及風管內的實測，指出相對濕度高於 70% 的時間累積率高於 30% 時 (即某時間段中相對濕度超過 70% 的時間超過該統計時段的 30%)，黴菌的生長速度與時間累積率成正比。可知相對濕度在 70~75% 以上時將造成較高的生物性污染風險，而環境中相對濕度高於 70% 的時間越頻繁，造成居住者健康的危害就越大。

2-2 調濕建材的效果

建材的調濕效果，即採用濕氣容量大的建材，於室內濕度高時吸收空氣中的水蒸氣，而於濕度低時放出水蒸氣，來減少濕度變動的範圍。在日本工業規格 (JIS) 中已制定了調濕建材的標準測試法，包含了 JIS A1470-1 (日本工業規格, 2002a) 評估材料於濕氣變動時之反應 (response)，以及 JIS A1470-2 (日本工業規格, 2002b) 評估濕度週期變化時之吸放濕量。然而，上述標準測定法僅限於建材的性能，使用於室內空間當中時，性能將受到換氣量、使用時間、外氣狀況等影響。因此欲探討調濕建材於實際空間中的性能時，文獻中多以數值解析為主。Hameury (2005) 與 Osanyintola 等研究者 (2006a) 以數值解析進行調濕建材於空間中使用的性能，指出以實木與合板作為室內裝修建材時可有效緩和濕氣變動，減少高濕度與低濕度的出現頻率 (peak cut effect)，並可解決冬季室內結露問題，以及有效減少換氣量以提供節能效果。然而，這些研究所探討之氣候多為溫帶、寒帶氣候，因冬季寒冷且室內濕度過低，利用加濕器時又易造成室內結露的問題，並須積極減少換氣量以減少室內暖房負荷。這些研究成果與台灣熱濕氣候下之使用行為差異甚大，而調濕建材在熱濕氣候下的性能探討仍然相當地少。

2-3 建材調濕效果的數值解析手法

為了解析多孔質建材吸放濕的現象，必須完整計算建材內熱與水分 (包含水蒸氣與液態水) 的收支與移動，Philip 等研究者 (1957) 以質量守衡與能量守衡推導出土壤中熱與水分之物理模型，成為解析多孔質材料中熱與濕氣移動時之法則。而後日本的 Matsumoto 等研究者 (1990/91) 與德國的 Kunzel 等研究者 (2005) 均依據上述物理模型，提出建築壁體與建材中熱與濕氣同時移動之數值模型。然而，該物理模型屬於偏微分方程式，吉田治典等研究者 (1991) 提出了利用傅利葉變換 (Fourier transform)，松本衛教授 (日本建築學會編, 2001) 提出了以拉普拉斯變換 (Laplace transform) 的解析方式。近年，隨著電腦數值運算方式的發展，以有限體積法 (Finite Volume Method)

或差分法 (Finite Difference Method) 求解上述方程式成爲數值解析的主流，許多文獻亦指出，數值解析之精度與實驗、實測結果相當吻合 (Hameury, 2005) (Osanyintola, et al., 2006b) (Rode, 2004)，證實數值解析手法具有相當的信賴性。

三、木地板的濕氣物性測定與計算

爲了建立調濕建材的數值解析預測模式，本研究以住宅居室常鋪設之木地板做爲研究對象，並採用前述 Matsumoto 所提出適用於室內建材解析之 hygroscopic 領域¹方程式進行解析，方程式爲求解未知數絕對濕度與溫度的兩方程式組，以一維模式呈現如式 1~2 所示。兩式中左側爲單位時間內建材內部之熱與水蒸氣變化量，而右側第一項爲熱與水蒸氣的傳導 (擴散)，第二項爲氣態水變成液態水所產生之潛熱與水蒸氣減少量，即相變化速率，爲相對濕度與溫度的函數，可展開如式 3 所示，以封閉這個兩未知數的兩方程式。

$$\text{熱：} \quad H_{mat} \rho_{mat} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L \left(\rho_{mat} \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) \quad (1)$$

$$\text{水蒸氣：} \quad \Phi \rho_{air} \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda'_x \frac{\partial X}{\partial x} \right) - \left(\rho_{mat} \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) \quad (2)$$

$$\rho_{mat} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \frac{\partial X}{\partial t} - v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

$$\left(\text{式 3 中 } \kappa = \rho_{mat} \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad v = -\rho_{mat} \frac{\partial \theta}{\partial T} \right)$$

[符號說明]	H_{mat} ：建材比熱(J/kg/K)	ρ_{mat} ：建材密度 (kg/m ³)
T ：絕對溫度(K)	x ：建材剖面方向距離(m)	t ：時間(s)
λ ：熱傳導率(W/m/K)	L ：水的凝縮潛熱(J/kg)	θ ：容積含水率(m ³ /m ³)
Φ ：材料之孔隙率(m ³ /m ³)	ρ_{air} ：空氣密度(kg/m ³)	X ：絕對濕度(kg/kg')
λ'_x ：絕對濕度差基準之水蒸氣傳導率(kg/m ² /s/(kg/kg'))		

然而，爲了進行上述方程式的解析，需要建材的熱與濕氣物性值。許多文獻對於熱環境解析所需之建材物性值 (如比熱、熱傳導率等) 均有詳細的測定資料，但對建材濕氣解析時所需之濕氣物性值則相當少。本研究對木地板進行孔隙率 Φ 、與平衡含水率曲線之測定 (κ 與 v)，並由孔隙率測定等資料推導濕氣傳導率 (λ'_x)，以提昇數值解析之嚴謹度與可信度。

3-1 建材孔隙率測定與濕氣傳導率的推導

本研究採用安宅勇二等研究者（2005a）所提出之濕氣傳導率簡易推定法，由 MIP 法（水銀壓入法：Mercury Intrusion Porosimetry）測定之平均細孔半徑、曲折率以及孔隙率來推導出濕氣傳導率。多孔質固體是由實體部與孔隙所構成，而孔隙是由許多大小不同的細孔所組成的。調濕建材中水蒸氣擴散速度 q 可由 Fick 的濃度擴散定律，如式 4 描述。其中的 D_c 稱為有效擴散係數，與濕氣傳導率含意相同，因單位不同故名稱相異，可由水蒸氣密度進行換算²。

$$q = -D_c \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4)$$

[符號說明] q ：擴散速度(kg/m²/s) D_c ：氣體有效擴散係數(m²/s)
 C ：氣體濃度(kg/m³) x ：建材剖面方向距離(m)

建材孔隙中的水蒸氣擴散，在不考慮細孔曲折下可分成較大孔隙中之分子擴散（濃度擴散）與較小孔隙中的 Knudsen 擴散，建材孔隙中包含這兩種擴散行為之擴散係數 D 如式 5 所示。式中的 D_{air} 為水蒸氣於空氣中的擴散係數，而 D_{KA} 為 Knudsen 擴散的擴散係數，可由絕對溫度 T 、分子量 M 及平均細孔半徑 r 求得，如式 6 所示。然而，實際建材中的細孔構造相當複雜，細孔間並非完全直線且相通，而是有許多的曲折。描述曲折細孔中實際擴散行為的有效擴散係數 D_c ，可依據圓筒狀細孔物理模型，將有效擴散係數與曲折度與建材孔隙率之關係式描述如式 7 所示(化学工学協會，2001)。因此，只要能夠量測出建材之孔隙率 Φ 、曲折度 τ 與平均細孔半徑 r ，便可有效推導出建材的有效擴散係數 D_c 。

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_{air}} + \frac{1}{D_{KA}} \quad (5)$$

$$D_{KA} = 0.97r(T/M)^{1/2} \quad (6)$$

$$D_c = \frac{\Phi}{\tau} D \quad (7)$$

[符號說明] r ：平均細孔半徑(m)
 τ ：曲折度(-) D_{air} ：氣體於空氣中之擴散係數(m²/s)
 M ：分子量(kg/mole) D_{air} ：氣體於建材中之 Knudsen 擴散的擴散係數(m²/s)

本測定用木地板試料（基材為合板）由建材店購入，以 MIP 法進行孔隙率、平均細孔半徑及曲折度的測定，而測定則委託研究機關進行³。測定前將試料於室溫進行一天的真空乾燥，測定裝置為 Micromeritics 公司所製，細孔分布測定範圍則為 0.018~100 μm 。測定結果如表 1 所示，與既有文獻 JIS A1324（日本工業規格，1995）與 ISO 12572（ISO, 2001）中以透濕杯法（cup method）測定結果之比較如表 2 所示⁴。可看出以本方法推導之濕氣傳導率，較合板稍高但與木纖維板相近，木地板之物性因木料、製程等有很大的差異，無法單純比較，但本測定經比較後可客觀判定為適當的數值。

表 1 木地板之測定結果

平均細孔半徑 r (μm)	孔隙率 Φ (m^3/m^3)	曲折度 τ
0.044	0.57	1.59

表 2 木地板之濕氣傳導率 λ'_p 與有效擴散係數 D_c (23°C)

測定者	試料	λ'_p [$10^{-12} \text{ kg/m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$]	D_c [$10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$]	試驗法
本研究	木地板	26.73	36.1	以 MIP 法算出
*1	合板	0.27~9.8	0.36~13.2	透濕杯法 (cup method)
*2	合板	1.1~19	1.49~25.7	
*3	木纖維板	16~58	21.6~78.4	
*2	木纖維板	26~68	35.2~91.9	

*1 Institute for research in construction data from an IEA common exercise (日本建築學會, 2001)

*2 Burch, D.M. et al., 1992

*3 Richards, R.F. et al., 1992

3-2 平衡含水率曲線的測定

本研究採用安宅勇二等研究者(2005b)所提案之 MSB 法(Magnetic Suspension Balance method: 磁氣浮游天秤法)進行平衡含水率曲線的測定,此測定法相較於日本工業規格的標準測定法,可以大量減短測定時間,且精度較高。MSB 法採用精密磁氣天秤量測建材於各種環境濕度下的重量變化,屬於直接測定法中的重量法(gravimetric method)。測定用磁氣浮游天秤如圖 1 所示,測定原理為將一定溫度之乾燥空氣與飽和空氣依比例混合後,送至試料測定部,依據試料吸附與脫附水蒸氣時之重量變化可得到平衡含水率。MSB 法的最大特徵為試料的重量變化由不相連的磁石所量測,對於腐蝕性氣體亦可進行測定,且重量測定精度達 $10\mu\text{g}$,只需 10g 以內的少量試料即可完成量測,使測定時間大幅縮短。本測定將上述木地板試料在不破壞細孔構造下小心切割,測定條件如表 3 所示。為取得建材在不同濕度(式 3 中的 κ)與溫度(式 3 中的 ν)條件下的平衡含水率,溫度設定為 23°C 及 15°C ,相對濕度設定為 0~90%。

本研究之測定結果與既有研究之比較如圖 2 所示,可看出本測定與既有文獻之測定結果相近,差異約在 10%左右,可以看出本測定具有一定之信賴性。另外,圖 3 為水蒸氣吸附與脫附時之測定結果,可以看出因細孔構造所產生之吸放濕速度差異,此現象稱為履歷現象(hysteresis)。然而,因履歷現象在數值解析中相當複雜,因此大多數採用數值解析之文獻均以吸附曲線做為平衡含水率曲線,而本研究亦採吸附曲線進行解析。

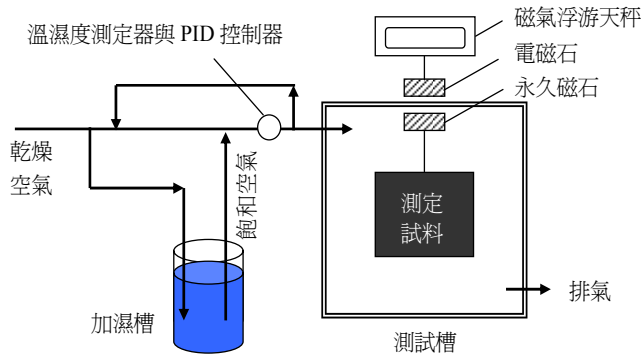


圖 1 MSB 法之測定裝置示意圖

表 3 測定條件

溫度[°C]	15	23
相對濕度[%]	0~90	
測定槽溫度[°C]	35	
氣化器溫度[°C]	30	
濕度平衡判斷值[%]	±0.2	
重量平衡判斷值[g/s]	10 ⁻⁶ /240	10 ⁻⁶ /120
重量平衡時間[s]	600	

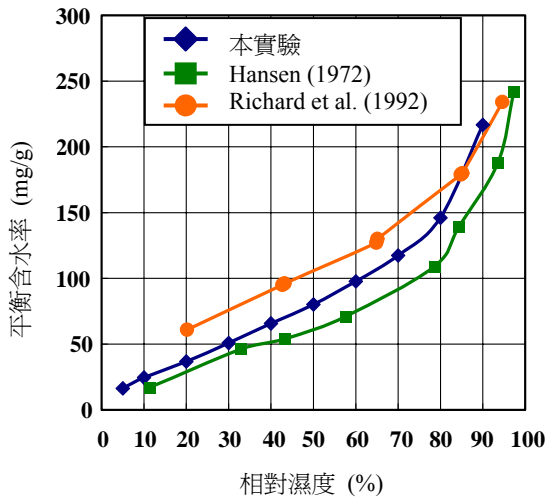


圖 2 平衡含水率曲線測定結果之比較(23°C)

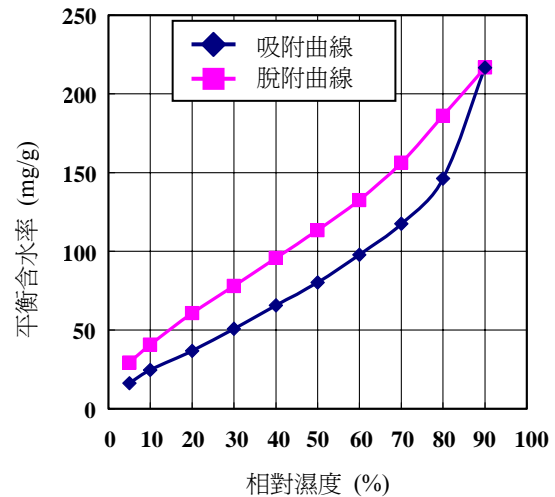


圖 3 吸附與脫附曲線之測定結果(23°C)

四、台灣氣候下之數值模擬手法與解析條件

4-1 數值模擬手法

考慮台灣地區住宅之使用行為，本研究之調濕建材模擬包含對室內氣候與空調耗能的解析，而解析內容之室內熱與濕氣移動如圖 4 所示，包含了木地板內部之熱與濕氣同時移動、室內外換氣所造成之熱與濕氣移動、空調從室內空氣中所移除之顯熱與潛熱、夜間室內人員所放出之熱與濕氣，以及照明對室內產生之顯熱負荷。藉由質量守恆與能量守恆，計算室內濕氣與熱能的收支，即可預測室內溫度與濕度的變化（新建築學大系編集委員會編，1984）。

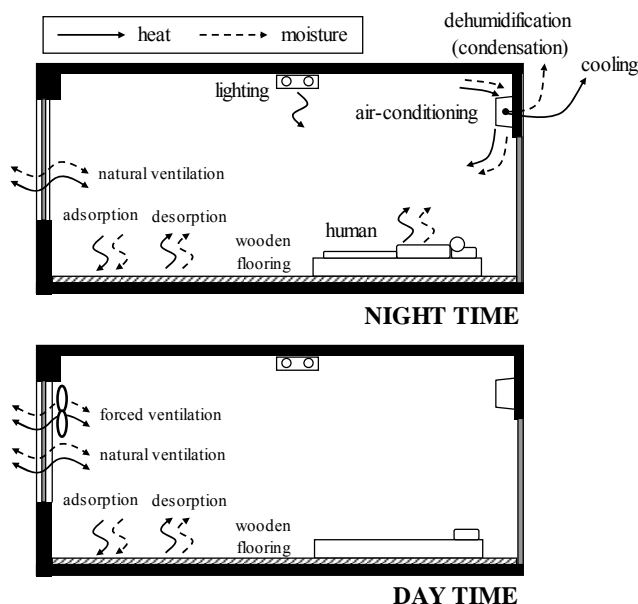


圖 4 解析之室內外與空調之熱與濕氣移動示意圖

4-2 壁體內熱與濕氣同時移動

本研究採用前述 Matsumoto 提出之數值模型進行模擬。模擬程式以 fortran 語言寫成，壁體內之熱與濕氣移動部分，以差分法（時間項：Crank-Nicolson 差分，距離項：中心差分）將上述偏微分方程組離散成差分方程組，並採用 SOR 法（successive over-relaxation method 法）求解這個多元一次連立方程組，並以緩和係數（或稱為鬆弛係數）增加收斂速度。

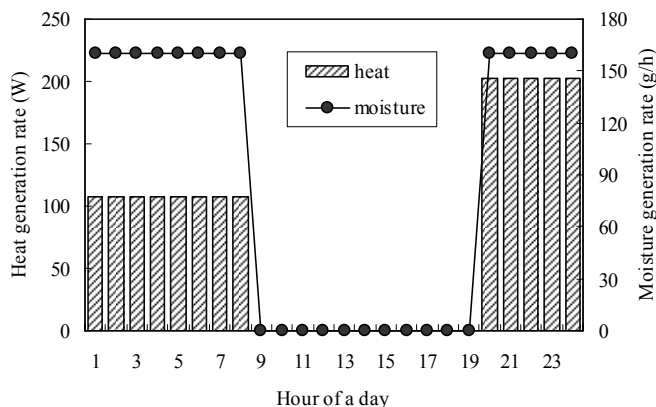


圖 5 室內人員與照明造成之熱與濕氣產生時間表

4-3 室內解析條件

本論文以住宅單室為解析對象，利用台北市、台中市與高雄市等台灣三主要都市之逐時標準氣象年資料（林憲德等，2005）進行模擬。解析空間尺寸為 330cm x 570cm x 240cm，室面積約為 18.8m²，容積約為 45.1m³。

調濕建材為厚度 2cm 木地板，設置面積為 18.8m²，木合板之物性值為前述之測定值，解析時厚度方向等距離分割為 20 等分。室內人員與照明造成之熱與水蒸氣產生量如圖 5 所示，依據文獻值（新建築學大系編集委員會編，1984）設定 20:00~24:00 為 203W（含 2 人之顯熱 108W 與照明顯熱 95W）與 160g/h（80g/h/人）；24:00~8:00 為 108W（睡眠時無照明）與 160g/h（80g/h/人）；8:00~20:00 則考慮室內無人，也就是無熱與濕氣的產生。

室內溫度與絕對濕度的計算以空間瞬間完全擴散之假定，依據能量與質量守衡定律推導如式 8 與式 9 所示，等號左側是單位時間內室內空氣中的熱與水蒸氣變化量，而等號右側分別為建材表面吸放（第 1 項）、換氣（第 2 項）、空調（第 3 項）以及人員與照明等內部產生量（第 4 項）對室內所增加之熱與水蒸氣量。

室內空氣與建材表面之邊界條件(boundary condition)以式 10 與式 11 表示，而式中建材表面與空氣間的熱交換採包含對流與輻射之綜合熱傳達率 9.3W/m²/K，而濕氣傳達率為 1.263 x 10⁻² kg/m²/s/(kg/kg')。解析時考慮建材內的濕氣移動相當緩慢（由濕氣傳導率可看出），動態（非穩態）解析之時間間隔為 1 秒。另外，計算時假設木地板之背側與結構體間設置了隔熱材與防水層，因此設定為完全隔熱與隔濕條件，而該住宅單室與相鄰房間之間的熱與濕氣交換則不列入考慮。然而，本研究仍將外牆之熱傳與開口部日射等議題納入未來繼續研究之方向。

$$VH_{air}\rho_{air}\frac{\partial T_{in}}{\partial t} = \sum_i \alpha^i A^i (T_S^i - T_{in}) + Q_{OA}H_{air}\rho_{air}(T_{OA} - T_{in}) + Q_{SA}H_{air}\rho_{air}(T_{SA} - T_{in}) + G_H \quad (8)$$

$$V\rho_{air}\frac{\partial X_{in}}{\partial t} = \sum_i \alpha'^i A^i (X_S^i - X_{in}) + Q_{OA}\rho_{air}(X_{OA} - X_{in}) + Q_{SA}\rho_{air}(X_{SA} - X_{in}) + G_X \quad (9)$$

$$\lambda \frac{\partial T_{mat}}{\partial x} = \alpha (T_{in} - T_S) \quad (10)$$

$$\lambda'_x \frac{\partial X_{mat}}{\partial x} = \alpha' (X_{in} - X_S) \quad (11)$$

[符號說明]

V ：室容積(m ³)	A ：建材表面積(m ²)	H_{air} ：空氣比熱(kJ/kg/K)
T_{in} ：室內溫度(K)	T_S ：建材表面溫度(K)	T_{OA} ：外氣溫度(K)
T_{SA} ：空調吹出溫度(K)	Q_{OA} ：外氣換氣率(m ³ /s)	Q_{SA} ：空調吹出風量(m ³ /s)
G_H ：室內顯熱產生量(W)	G_X ：室內濕氣發生量(kg/s)	α ：建材表面熱傳達率(W/m ²)
上標 i ：室內的第 i 個牆面	α' ：建材表面物質傳達率(kg/m ² /s)	

4-4 夜間之換氣量與家用空調機解析

本論文採用之空調負荷解析因應台灣住宅空調使用行為，不考慮暖房之使用，而冷房則為當室內有人員（夜間）且室溫超過 26°C 時，冷卻室溫至 26°C。夜間空調使用時之出風量與 ACH (Air Changes per Hour, 換氣次數) 之設定如表 4 所示。考慮空調機打開時窗戶關閉，空調機吹出風量固定為 315m³/h，而此時室內之換氣量僅為外氣洩漏量 ACH=0.5；空調機關閉時則打開窗戶，此時 ACH=3。另外，空調機之控制程式亦以 fortran 語言寫成，空調計算程式的流程如圖 6 所示。考慮家用空調機以變頻（壓縮機轉速）控制，吹出溫度依據回風溫度與目標溫度調整，而當空調吹出溫度低於露點溫度（dew point temperature）時代表產生結露，此時吹出口之相對濕度為 100%，而結露（除濕）量則為空調機入口與出口的絕對濕度差。上述露點溫度 T_d 以 Barenbrug (1974) 提出之計算式(式 12~13)加以計算，式中之 $a=17.27$, $b=237.7^{\circ}\text{C}$ 。而空調機之除去顯熱 R_{SH} 與潛熱量 R_{LH} （熱負荷）分別以式 14 與式 15 計算。

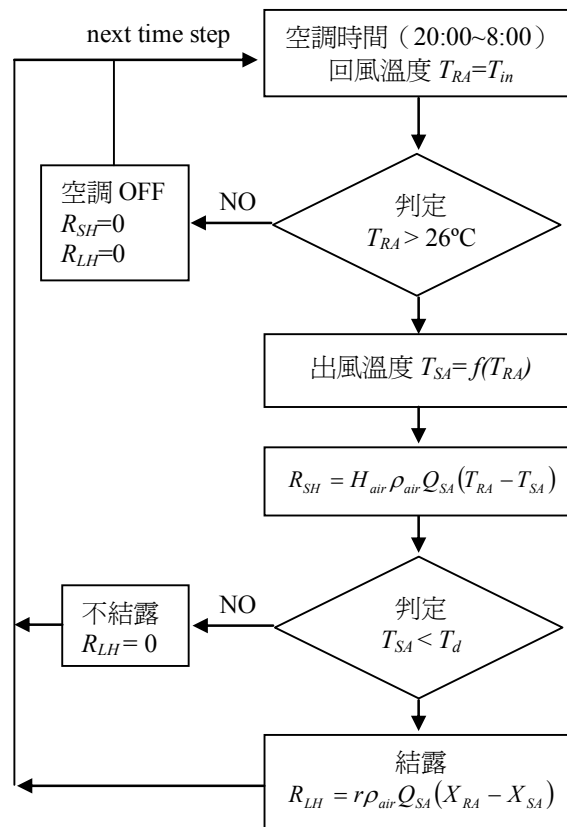


圖 6 空調計算程式的流程

在空調開啓時，式 8 中的溫度將被控制為 26°C 固定值，因此式 8 等號左側的溫度的時間變化是 0，此時空調移除的負荷(等號右側第 3 項)會與壁體放熱放濕(右側第 1 項)、外氣(右側第 2 項)與室內人與照明負荷(右側第 4 項)的總和相同，正負相反。因此，式 14~15 所表示的空調負荷計算即與式 8~式 9 等號右側的第 3 項相同，正負相反。另外，式 14 中的空調回風溫度 T_{RA} 與式 8 中的

室內空氣溫度 T_m 是相同的，這是空間均一擴散假設下空調負荷計算的基本假設。而空調耗電量的計算方式為將動態計算（時間間隔為 1 秒）求得每秒耗能量後，每小時累算 3600 筆即為每小時耗能量（kWh），將每小時的值加起來則為全年耗能量。

$$T_d = \frac{b \cdot f(T, RH)}{a - f(T, RH)} \quad (12)$$

$$f(T, RH) = \frac{a \cdot (T - 273.15)}{b + (T - 273.15)} + \ln(RH) \quad (13)$$

$$R_{SH} = H_{air} \rho_{air} Q_{SA} (T_{RA} - T_{SA}) \quad (14)$$

$$R_{LH} = r \rho_{air} Q_{SA} (X_{RA} - X_{SA}) \quad (15)$$

[符號說明]

T_d ：露點溫度(°C)

RH：相對濕度(-)

R_{SH} ：顯熱除去量(kW)

R_{LH} ：潛熱除去量(kW)

L ：水的凝縮潛熱(J/kg)

4-5 日間換氣量設定與解析案例

本文為提升調濕建材於夜間吸收濕氣之效果，提出於日間外氣溫度較高、相對濕度較低時增加換氣量以進行建材乾燥之對策。採用之 4 種換氣方式之 ACH 變化如圖 7 所示，為了比較有無調濕建材之影響，Type 0 為不設置調濕建材之案例，日間 ACH=0.5；Type 1 為基本案例，設定為日間外出關窗，ACH=0.5；Type 2 與 Type 3 為日間持續以換氣扇等機械換氣手法增加換氣量，ACH 分別為 3 與 5；Type 4 則是於 11:00~17:00 期間以換氣扇進行 ACH=5 的機械換氣。另外，與解析案例依據外部氣候，分成台北市（TP）、台中市（TC）、高雄市（KA），依據各種換氣模式依據編號為 TP0~TP4，TC0~TC4 與 KA0~KA4，共 15 個解析案例。然而，本文中增加換氣量所造成之風扇動力並未納入耗能計算⁵。

表 4 夜間（20:00~8:00）之空調與 ACH 設定

	室溫 > 26°C	室溫 ≤ 26°C
空調	on	off
窗戶	close	open
空調吹出風量 (m ³ /h)	315	0
ACH (1/h)	0.5	3

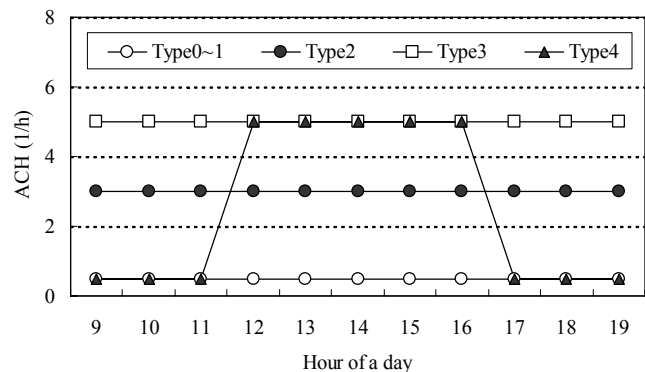


圖 7 各種換氣策略日間（8:00~20:00）之 ACH 變化

五、數值模擬結果與討論

5-1 室內的高濕度環境與室內空氣品質

在 2-1 的文獻調查中得知相對濕度在 70~75%以上時將造成較高的生物性污染風險，而環境中相對濕度高於 70%的時間越頻繁，造成居住者健康的危害就越大。圖 8~10 中統計台北、台中與高雄氣候下，一年的計算期間中室內相對濕度出現超過 70%、80%與 90%的累積時間比例。可以看出在所有的案例中，與未設置調濕建材之案例（TP0, TC0 與 KA0）相比，設置調濕建材時可以有效減少室內相對濕度 90%以上的出現時間。於台北氣候下，TP1 與 TP4 抑制相對濕度超過 70%、80%與 90%的效果較其他案例為佳，而增加日間換氣量的案例中，TP2 與 TP3 未能提昇調濕建材效果的原因，是因為台北的外氣在 8:00~11:00（早晨）與 15:00~18:00（傍晚）溫度仍低且潮濕，此時增大換氣量未能有效提供建材乾燥之效果，而僅於 11:00~15:00（中午）增加換氣量的 TP4 換氣方式則提供了較佳的效果。

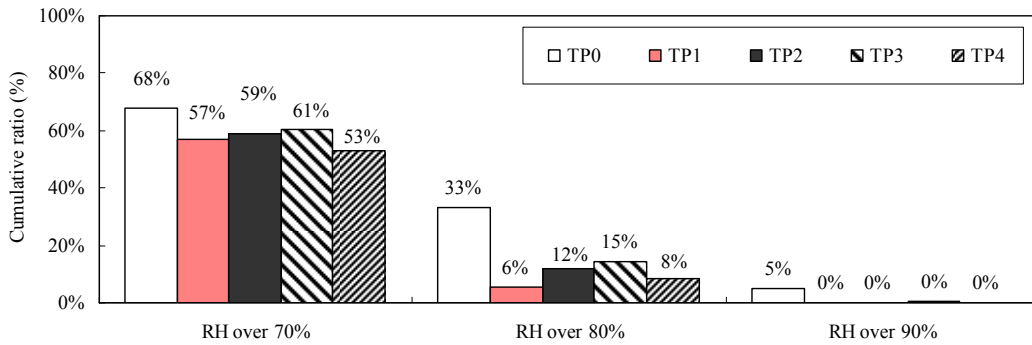


圖 8 台北氣候下各解析案例（TP0~TP4）的相對濕度累積率

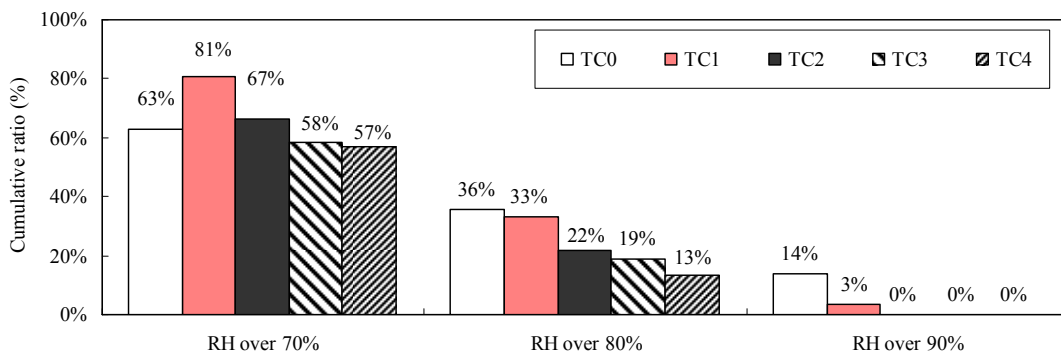


圖 9 台中氣候下各解析案例（TC0~TC4）的相對濕度累積率

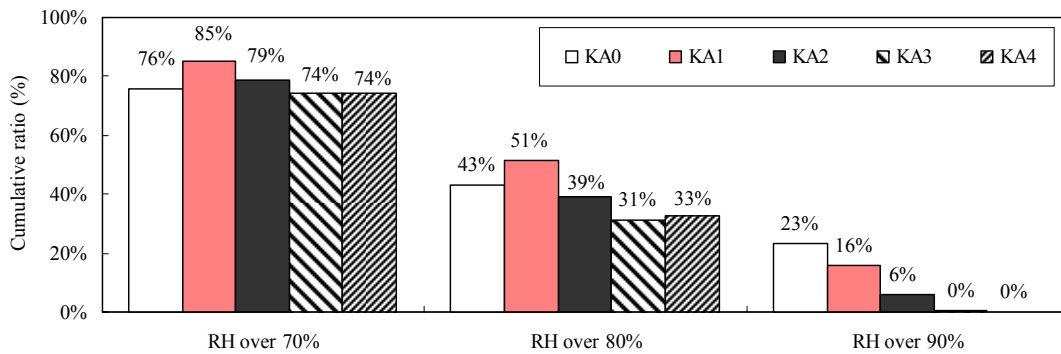


圖 10 高雄氣候下各解析案例 (KA0~KA4) 的相對濕度累積率

在台中氣候下，使用調濕建材雖可抑制相對濕度超過 90% 的出現時間，但 TC1 與 TC2 案例中，相對濕度超過 70% 或 80% 的時間卻增加了，這是因為調濕建材僅能緩和相對濕度的變動幅度 (peak-cut 效果)，而非無限制的吸收濕氣；但若能於日間外氣溫度較高且較乾燥時增加換氣量，TC3 與 TC4 案例中可看出可以減少相對濕度超過 70%、80% 與 90% 的出現時間。在高雄氣候下，各案例的結果與台中氣候類似，改變日間換氣量的 KA3 與 KA4 中可看出調濕建材效果的提昇。

5-2 空調熱負荷的解析結果

圖 11 為解析案例 TC2 於 7 月份的外氣溫度、室內溫度與空調吹出溫度，而圖 12 同樣為案例 TC2 於 8 月 21~27 日之空調逐時顯熱與潛熱負荷。圖 13 顯示所有案例中空調所除去之熱負荷 (式 14~15，含顯熱與潛熱)。可以看出除了使用調濕建材與未使用調濕建材 (TP0、TC0 與 KA0) 相比，空調的熱負荷均較高，這是因為無調濕建材的案例中未考慮建材熱容量 (空調進行降溫時需增加冷卻建材的耗能)，以及調濕建材於夜間吸收濕氣時建材因水分產生相變化使得溫度升高 (式 1 的右側第 2 項) 所造成。在各個案例當中更可看出 Type3 與 Type4 的耗能量均較其他換氣方式高，這是因為日間乾燥效果提昇時，夜間吸收濕氣量增加所造成的熱負荷。

然而，本論文僅計算空調所移除的熱負荷，並非空調耗電量。因考慮各種家用空調機 (窗型、分離式等) 在各種負荷狀態下的 COP (Coefficient of Performance, 成績係數) 均不相同，再加上廠牌的性能差異，為了避免本論文的主題失焦，本研究將空調的 COP 與耗電量的探討列為未來之課題。

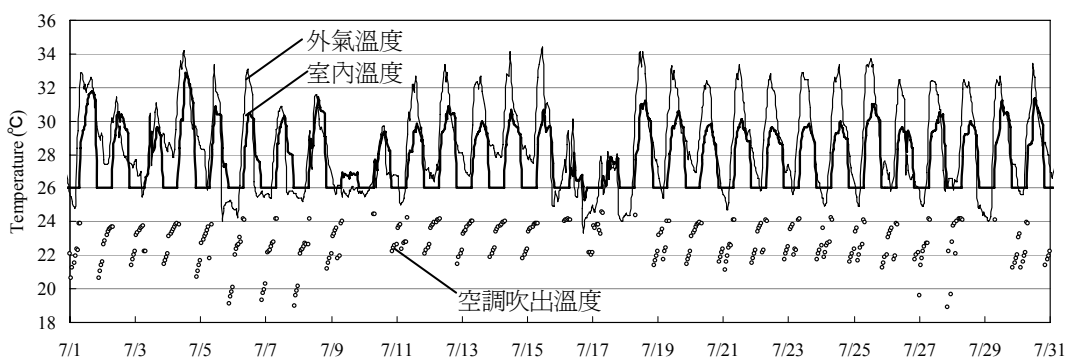


圖 11 解析案例 TC2 於 7 月份的外氣溫度、室內溫度與空調吹出溫度

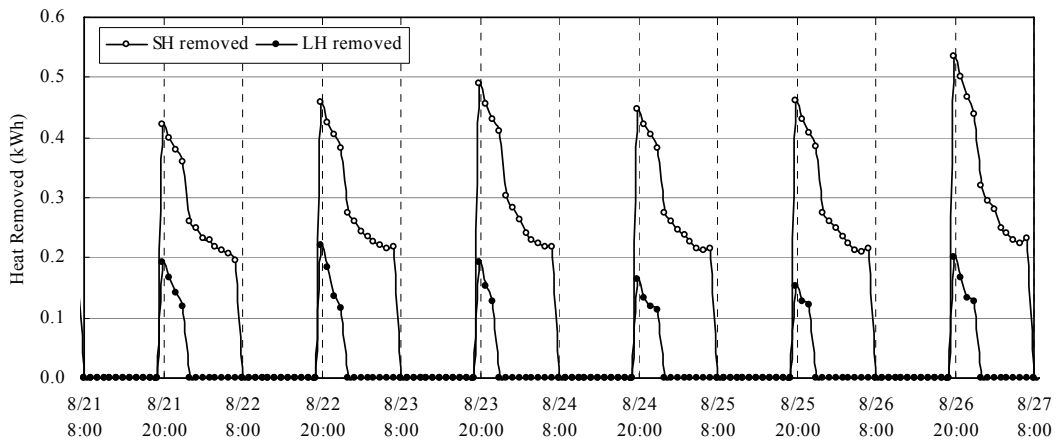


圖 12 解析案例 TC2 的 8 月 21~27 日空調逐時顯熱(SH)與潛熱(LH)負荷

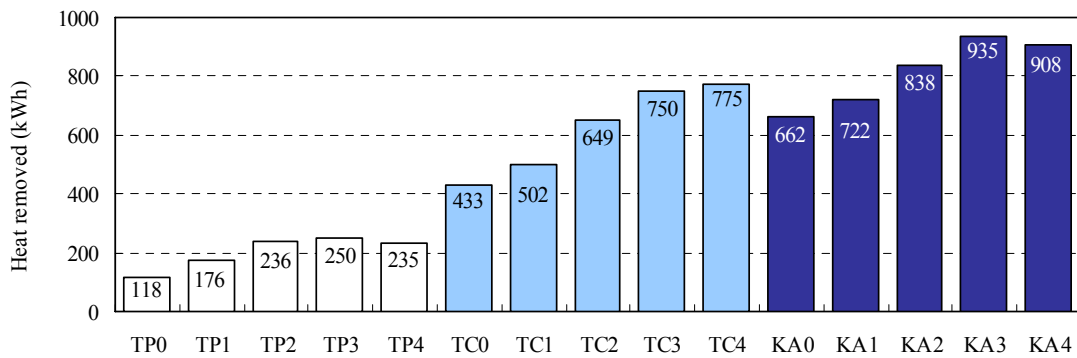


圖 13 所有解析案例的全年累計空調熱負荷

六、結論

本文探討台灣氣候下使用調濕建材之適用策略，首先以建材濕氣物性實驗取得數值解析所需之建材資料，而後以各種日間換氣量變化模式以提昇調濕建材效果的策略進行模擬。本研究同時以健康（生物性污染風險）與耗能（空調熱負荷）來評估調濕建材的效果。空氣品質部分若以能夠同時減少相對濕度超過 70%、80%與 90%的時間，空調耗能部分以最小的空調負荷為最佳案例來評估時，台北、台中與高雄氣候下適用之最佳換氣量策略均不同，台北以 TP1、台中以 TC3、高雄則以 KA4 為最佳換氣策略。可見室內調濕建材設置時的換氣策略應隨當地氣候而調整，方能得到最佳的效果。本研究結果不但可做為建築專業人員在進行室內建材選擇時之依據，亦提出台灣三主要都市氣候下使用調濕建材時兼顧健康與節能之有效運用方法。然而，本研究目前僅具備台灣西岸都市化地區之代表性，未來計畫將配合國內平均氣象年之資料建立，納入宜蘭、台南及台東等地進行比較，以期能完整代表台灣地區之氣候。

誌謝

本研究感謝國科會專題研究（計畫編號：96-2218-E-034-002-）之補助，謹此誌謝。並感謝東京大學生產技術研究所加藤與大岡研究室提供實驗設備，以及國立嘉義大學景觀學系黃國倉助理教授於研究過程之協助。

參考文獻

- 中央氣象局（1971-2000）〈中央氣象局統計資料〉，www.cwb.gov.tw。
- 林憲德，黃國倉（2005）〈台灣 TMY2 標準氣象年之研究與應用〉《建築學報》，53 期：79-94。
- 紀碧芳（2003）《受黴菌污染建材上之黴菌種類研究》，國立成功大學環境醫學研究所碩士論文。
- Andrade, C., J. Sarria, and C. Alonso, et al. (1999) Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering, *Cement and concrete research*, Vol.29: 1249-1259.
- Abe, K. (1996) Assessment of Indoor Climate in an Apartment by Use of a Fungal Index, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 62: 959-963.
- Barenbrug, A.W.T. (1974) *Psychrometry and Psychrometric Charts*, 3rd Edition, Cape Town, S.A., Cape and Transvaal Printers Ltd.
- Bornehag, C.G, J. Sundell, S. Bonini, A. Custovic, P. Malmberg, S. Skerfving, T. Sigsgaard, and A. Verhoeff (2004) Dampness in buildings as a risk factor for health effects, EUROEXPO: a multidisciplinary review of the literature (1998–2000) on dampness and mite exposure in buildings and health effects, *Indoor Air*, Vol.14:243–257.
- Burch, D.M., Thomas, W.C. and Fanney, A.H. (1992) *ASHRAE Transactions*, Vol.98, Part 2.
- Clarkea, J. A., C. M. Johnstonea, N. J. Kellya, R. C. McLeana, J. A. Andersonb, N. J. Rowanb, and J. E. Smithb (1999) A technique for the prediction of the conditions leading to mould growth in buildings, *Building and Environment*, Vol. 34:515-512.
- Fischera, G, T. Müllera, R. Schwalbea, R. Ostrowskia, and W. Dott (2000) Exposure to airborne fungi, MVOC and mycotoxins in biowaste-handling facilities, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol.203, Issue 2: 97-104.
- Hameury, S. (2005) Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study, *Building and environment*, 40(10):1400-1412.
- Hansen, K. K. (1972) *Sorption Isotherms - A Catalogue*, The Technical University of Denmark, Technical Report.
- Harper, G. J. (1961) Airborne micro-organisms: Survival tests with four viruses, *The Journal of Hygiene*, Vol. 59, No. 4: 479-486.
- ISO (2001) ISO 12572: Hygrothermal performance of building material and products – Determination of water vapor transmission properties, International Organization for Standardization, Swiss.
- Kunzel, H. M., et al. (2005) Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope, *Solar Energy*, Vol. 78: 554-561.
- Leino, M., M. Makelaw, K. Reijulaz, T. Haahtelaw, H. Mussalo-Rauhamaaw, T. Tuomiz, E.-L. Hintikkaz and H. Alenius (2003) Intranasal exposure to a damp building mould, *Stachybotrys chartarum*, induces lung inflammation in mice by satratoxin-independent mechanisms, *Clin Exp Allergy*, Vol.33:1603–1610.
- Matsumoto, M. and Y. Tanaka (1990/91) A numerical analysis of moisture behavior in a porous wall by quasilinearized equations, *Energy and Buildings*, Vol. 15-16: 861-874.
- Osanyintola, O. F., et al. (2006a) Effect of initial conditions, boundary conditions and thickness on the moisture

- buffering capacity of spruce plywood, *Energy and Buildings*, Vol.38: 1283-1292.
- Osanyintola, O. F., and C. J. Simonson (2006b) Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact, *Energy and Buildings*, Vol.38, Issue 10: 1270-1282.
- Philip, J. R. and de Vries, D. A.(1957) Moisture movement in porous materials under temperature gradients, *Trans. Amer. Geophys. Union*, Vol.38: 222-232.
- Richards, R.F., Burch, D.M. and Thomas, W.C. (1992) Water vapor sorption measurements of common building materials, *ASHRAE Transactions*, Vol.98(2): BA-92-6-1.
- Rode, C., et al. (2004) Evaluation of moisture buffer effects by performing whole-building simulation, *ASHRAE Transactions*, Vol. 110, issue 2: 783-794.
- Wessén, B., and K.-O. Schoeps (1996) Microbial volatile organic compounds—what substances can be found in sick buildings?, *The Analyst*, 121(9): 1203-1205.
- Wu, P.-C., H.-J. Su, and C.-Y. Lin (2000) Characteristics of indoor and outdoor airborne fungi at suburban and urban homes in two seasons, *The Science of The Total Environment*, Vol. 253, Issues 1-3: 111-118.
- 日本工業規格 (2002a)《JIS A1470-1：調湿建材の吸放湿性試験方法—第 1 部：湿度応答法》，日本規格協会，東京。
- 日本工業規格 (2002b)《JIS A1470-2：調湿建材の吸放湿性試験方法—第 2 部：密閉箱法》，日本規格協会，東京。
- 日本工業規格 (1995)《JIS A1324：建築材料の透湿性測定方法》，日本規格協会，東京。
- 化学工学協会編 (2001)《化学工学便覧 改訂六版》，丸善株式会社，東京。
- 吉田治典，寺井俊夫，末吉弘明 (1991)〈多層壁の熱・水分同時移動における三角波応答の離散フーリエ変換による計算法〉《空気調和衛生工学会論文集》，No.46：21-30。
- 池田耕一等人 (2005)〈シックハウスに関する海外の法規制など〉《シックハウスを防ぐ最新知識》：42-51，丸善株式会社，東京。
- 安宅勇二，加藤信介，朱清宇 (2005a)〈水銀圧入法による各種建築材料・吸着剤の有効拡散係数の算出〉《日本建築学会環境系論文集》，No.589：15-21。
- 安宅勇二，加藤信介，徐長厚，朱清宇，長谷川あゆみ (2005b)〈各種建築材料および吸着材の水蒸気およびホルムアルデヒド吸着等温線の測定〉《日本建築学会環境系論文集》，No.595：49-56。
- 柳宇，池田耕一 (2007)〈空調システムにおける微生物汚染の実態と対策に関する研究：第 1 報 微生物の生育環境と汚染実態〉《日本建築学会環境系論文集》，No.593：49-56。
- 新建築学大系編集委員会編 (1984)《新建築学大系 10—環境物理》，章国社，東京。

註釋

¹ hygroscopic 領域指環境之相對濕度於約 98%以下時，建材內水蒸氣擴散遠大於液態水的擴散，即水蒸氣擴散支配領域，可忽略液態水的移動而推導出僅有水蒸氣變數（絕對濕度）之物理模型。

²一般氣體的質量濃度多以 kg/m^3 表示，其擴散速度多以擴散係數表示，單位為 m^2/s 或 m^2/h ；但水蒸氣的質量濃度多以絕對濕度 kg/kg 表示，因此擴散速度多以濕氣傳導率 $\text{kg/m/s}/(\text{kg/kg})$ 或 $\text{kg/m/s}/\text{Pa}$ 來表示。兩者之換算只要乘上該氣體之密度，修正質量濃度表示方式即可。

³本研究之 MIP 法實驗委託住友化學分析中心進行，但試料的管理、測定資料的檢查均在筆者的管理下進行。

⁴表中 λ_p 為水蒸氣壓基準之濕氣傳導率，為方便與既有文獻比較時使用。與式 2 中絕對濕度基準之濕氣傳導率 λ_x 意義相同，可換算如下： $1 \text{ kg/m/s}/\text{Pa} = 1.63 \times 10^5 \text{ kg/m/s}/(\text{kg/kg}) = 1.36 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

⁵風扇動力差距最大的 Type1 與 Type4 相比，年耗電量僅相差 5.54kWh，與空調耗能相比並無顯著影響，故本文中未列入計算（全壓 10pa、送風機效率 0.5、傳導裝置效率 0.98、安全係數 1.1）。