

# 以無線感測網路進行森林微氣候監測

賴彥任<sup>1</sup> 邱新榮<sup>2</sup> 魏曉輝<sup>1</sup> 沈介文<sup>1</sup> 林博雄<sup>3</sup>  
臺灣大學實驗林管理處<sup>1</sup> 臺灣大學森林環境暨資源學系<sup>2</sup> 臺灣大學大氣科學系<sup>3</sup>

## 摘要

林內環境受地球公自轉、全球大氣環流、地形起伏、植物蒸散作用與大氣交互作用形成微氣候對於生態多樣性有相當的影響，尤其植物的生長、發育及型態改變受環境因子的調控，而調控物候事件的環境因子中，溫度是最重要的因子之一，然而一般氣象站須位於空曠地點，與實際林內環境可能有極大落差，若以此氣象資料進行微環境生態相關研究實值得商榷。

本研究於溪頭森林生態自然教育園區佈放 30 個無線感測器，進行林外與不同林分小區域定點溫濕度等微氣象相關監測，並與現行資訊系統介接，除可於網路可查詢與擷取近即時資料外，亦可提供本區域重要樹種 (如銀杏、台灣杉、柳杉等)進行生理生態及物候相關研究之用。

觀測結果顯示柳杉樹高 3m 的中午氣溫較微氣象站低約 2~3°C；夜晚則無太大差異；相對濕度則於白日較微氣象站高約 5~10%。銀杏樹高 11m 的氣溫較 3m 高約 1°C。位於銀杏林邊界處之氣溫反應則居兩者之間。台灣杉樹高 3m 的相對濕度於白日較微氣象站高約 10%；夜晚則較微氣象站低約 5~10%。

關鍵字：微氣象、無線感測網路

## 一、前言與目的

林內環境受地球公自轉、全球大氣環流、地形起伏、植物蒸散作用與大氣交互作用形成微氣候對於生態多樣性有相當的影響，尤其植物的生長、發育及型態改變受環境因子的調控，而調控物候事件(phenological event)的環境因子中，溫度是最重要的因子之一(Larcher, 1995; Seeley et al. 1996; Fuchigami and Wisniewski, 1997; Chuine et al., 1999)，然而一般氣象站須位於空曠地點，與實際林內環境可能有極大落差，若以此氣象資料進行微環境生態相關研究實值得商榷。

近年來因無線傳輸技術精進，基礎氣象感測器更是不斷往迷你化發展，因此整合而成之無線感測網路(Wireless Sensor Networks, WSN)技術已達成熟並量產地步。無線感測網路提供一個高密度的時間與空間的監測，可讓生態學家更輕易瞭解大自然複雜的交互作用，而這些資訊都是以往傳統方式難以、甚至無法得知。此外透過該項技術以及網際網路的整合，甚至可將感應及偵測環境之因子數據以無線傳輸的方式送到資料至資料庫中心，達成全球化監測。目前相關產品皆內建溫濕度感測器，正可利用此技術進行森林微氣候及物候相關研究。

本研究即希能於國內的生態領域嘗試運用上述技術於森林微環境之微氣象資料收集，以提供生理生態及物候相關研究之用。

## 二、前人研究

近年來整合感測器、運算器以及通訊而成之無線感測網路(Wireless Sensor Networks, WSN)技術已達成熟並量產地步。無線感測網路的發展，最早是美國加州柏克萊大學(UC Berkeley)，David Culler教授主持的一項研究計劃，稱之為「智慧灰塵(Smart Dust)」。這項計劃是由美國國防部研究計劃單位(DARPA)所支助，原先的構想是應用在軍事上，然而近兩年來已逐漸廣泛運用在商業、軍事、醫藥、安全和生態學等領域。

Buonadonna(2005)分享了無線感測網路設計時所想到應符合的需求：

1. 對於終端使用者而言：
  - (1) 軟體容易安裝於各種作業系統。
  - (2) 佈署感測點的輔助工具，使用者可清楚觀測位置，並可掌握資料的品質與資料上網。
  - (3) 調整及重新設定的方便性，使用者可輕易調整觀測頻率、項目與規模。
  - (4) 可即時監測無線網路傳輸狀況，確保回傳正確無誤的資料。
  - (5) 達成最低干擾與可信賴無線網路通訊品質的需求。
  - (6) 與資料分析工具整合，達成即時資料分析的目的。
  - (7) 可完全稽核節點觀測、傳輸乃至進入資料庫過程中可能的所有狀況，以供追蹤錯誤來源。

- (8) 節點電力耗損及無線感測器壽命的評估，盡可能延長可觀測時期。

## 2. 對開發者而言:

- (1) 需有一個良好的應用介面，協助感測點佈署與資料可視化的監測。
- (2) 需有一個良好的軟體，協助感測器的增減與資料傳輸模式的設定。
- (3) 無線感測網路內的模組化服務元件，可供輕易的變更取樣頻率與時期。

Buonadonna 採用 Crossbow 公司所發展的 mica2、mica2dot 以為無線感測網路節點，並以 TinyDB 為主的控制處理機制，這個系統採用與一般資料庫類似的程式語法(SQL-like language, 稱之為 TinySQL)。系統內具有電力管理機制(Power Management)、時間同步機制(Time Synchronization)、查詢分享機制(Query Sharing)、背景看管監視機制(Watchdog)、節點內自行記錄等功能(Logging)。

該系統在實驗室內的佈署實驗共採54個感測節點，以13%的運作週期(duty cycle)，即節點每30秒甦醒工作4秒後即進入休眠狀態進行試驗。試驗結果有4個節點發生故障，資料回傳成功率最高有75%，最低30%，該試驗驗證系統中的電力管理和看管程式能持續使感測網路漲常運作，並提供開發研究者在感測網路應用和演算所需的資訊。此外，另在戶外的植物園內佈設23個感測節點觀測20天，以6.6%的運作週期，即節點每30秒甦醒工作2秒後即進入休眠狀態進行試驗。試驗結果有1個節點發生故障，資料回傳成功率最高有75%，最低22%。

在自然與生態領域之運用上，國外已有數個原型無線感測網路使用在環境監測，包括(Tolle *et al.*, 2005)：

1. Cerpa 等人(2001)採用一套無線感測網路系統，名為 ESS(Extensible Sensing System) 在 James Reserve Forest 放置 40 個無線網路觀測節點(node) 進行環境監測應用，監測項目包括溫濕度、土壤溫度及土壤濕度等，此外更在六個鳥巢內進行溫濕度監測。
2. Cardell-Oliver 等人(2004)監測當下雨時的土壤濕度的變化，此項試驗需節點能感測到暴雨的來臨，並進行高頻率的觀測，並於暴雨結束後回歸於低頻率觀測，此項試驗共進行了 15 天。
3. Martinez(2004)所隸屬的團隊採用名為 GlacsWeb 的系統，研究人員佈署 9 個節點於冰河內，監測壓力、溫度及傾斜，藉以瞭解冰河融化行為。
4. Batalin 等人 (2004) 在 James Reserve Forest 區域設置索車式的感測器來監測森林中在 70mX15m 垂直面的太陽輻射量分佈狀況，並以 2.4GHz 無線傳輸技術將資料傳回。
5. Mainwaring 等人(2002)在 Great Duck Island 佈設了 147 節點，以了解棲地的微氣候和鳥巢內鳥的存在與否，在 16 天觀測 221m 長、71m 寬近似橢圓的

範圍內，成功利用鳥巢內溫度的變化，偵測出鳥進出鳥巢的頻率與時間。兩年後，此計畫延續發展出即時(每秒偵測)的溫度觀測情形，可更精確的掌握鳥巢溫度與鳥的習性。

美國加州柏克萊大學 David Culler 團隊發展出無線感測網路時，即想運用此技術於生態領域，因此與該校生物學家 Todd Dawson 研究室合作。根據生物學家的討論中，瞭解生物學家想要觀察卻無法簡單地量測觀察的瓶頸，最終整合需求，再根據發展中的技術和量測分析的技巧，決定運用此技術探討加州紅木林的生態環境，並由英代爾柏克萊研究中心(Intel Research Berkeley)協助設計接收端的部分與對外以 GPRS 傳送的技术。

原生物學家在量測這些相關的氣候數據會設置一些傳統的技術來達成，同樣也會獲得某些程度的氣候基本變化的資料，但是無法達到更細微在整個結構上隨時間的變化情形。因此紅木觀測團隊採用已開發的感測系統，無線網路系統和資料庫運用技術，這些提供了相當彈性的觀測基礎給生物學者去探索其應用的領域。利用無線感測網路在樣區持續 44 天紅木生存的微氣候資料，生物學家成功的看到他們希望看到的資訊，正在想辦法去分析這些資料。未來若將無線感測網路視為單一的儀器設備，將可原單點觀測資料加上時間與空間等成為多維度有更多意義的資訊與知識。

Tolle *et al.*(2005)發表的紅木林 70m 高垂直剖面微氣候觀測研究中，共佈設 33 個節點，每 2 公尺垂直距離佈設一點，分佈如圖 1。採用感測節點為 Crossbow 公司生產之 Mica2Dot。可以外接所需的感測器：溫度；濕度，光照程度等等。而在封裝上則使用圓柱體方式(圖 2)，兩端面則是感測點位置。在網路上使用 Stargate 系統作為閘道並收集感測網路節點的資料，儲存在資料庫中，然後利用 GPRS 傳輸資料給外地的資料庫。

實驗期間每 5 分鐘觀測並紀錄一筆資料，在 44 天的觀測時期中，共有記錄資料 170 萬筆，經過篩選後有 820,700 筆資料(49%)可供分析。在有效輻射觀測的資料中，可看出在天氣晴朗時，個別的感測器中的有效輻射數值有相當大變化，原本認為這是因為風吹動樹葉所造成的遮蔽現象，但比較兩天的圖形則相當的類似，其真正原因應該是太陽角度移動的問題所造成。另從感測資料證明微氣候在空間的梯度的存在，同樣也收集到這些空間梯度在時間上變化的資料。有了這些資料提供可以生態學者進一步探討植物體內液流(sap flow)、植物蒸散作用等植物生理研究，另可探討森林生態系統在相對大尺度碳、水分交換作用現象。結論中，闡述無線感測網路的巨觀形式提供科學研究上的潛力，因為有空間和時間高密度的資訊需求，將感測網路佈署於現實的環境中接收資料未來大有可為。從這些大量資料整理分析成有意義的資訊同樣也是一大挑戰，未來若能發展出合適多維度的分析架構，將可以使問題的答案更容易具像的提出。

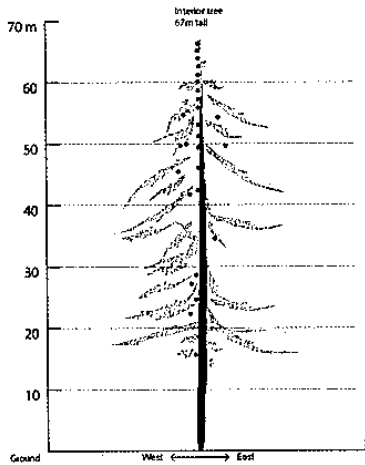


圖 1 紅木不同高度微氣候觀測分佈點(Tolle *et al.*, 2005)

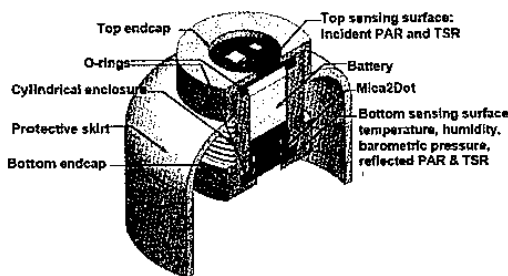


圖 2 無線感測網路節點封裝示意圖及儀器照片(Tolle *et al.*, 2005)

### 三、研究方法

國內運用無線感測網路技術於生態觀測仍屬起步階段，因此無論系統之穩定度、資料回傳成功率、溫濕度感測器觀測可信度、電力耗掉程度及在台灣高溫高濕多雨環境下的適用性等皆應進行評估。本章節依序陳述研究地點、儀器規格、儀器外盒通風筒設計介紹及儀器安裝等。

#### (一)研究地點說明

研究的初步構想即是想利用無線感測網路技術瞭解林內外之溫濕度差異，且需選擇一處有介接至網際網路之基地站接收資料，因此試驗地點選於臺灣大學實驗林管理處溪頭營林區苗圃氣象站儀器房為起始點。

溪頭營林區苗圃附近正好有很好的試驗環境可供測試，包括：

1. 苗圃之內有標準農業氣象站可供比對。
2. 苗圃為森林包圍之一個大空地，可視為林外氣候。
3. 苗圃周圍為柳杉(*Cryptomeria japonica*)林，為溪頭地區主要之造林樹種。
4. 柳杉林外圍則為台灣杉(*Taiwania cryptomerioides*)人工林，為臺灣特有杉科植物，與美國之紅木皆屬於世界零星殘留之孑遺植物。

#### 5. 鄰近台灣杉林有一區著名之銀杏林(*Ginkgo*

*biloba*)，亦為孑遺植物，屬中型落葉喬木，銀杏葉四季變化分明，此區為溪頭森林遊樂區重要景點之一。

本研究 2005 年 11 月 5 日完成初步各節點架設，並以苗圃氣象站儀器房為基地台，接收資料並匯入資料庫，再利用網際網路提供線上即時監控 (<http://sabo.fo.ntu.edu.tw/wsn2>)。

#### (二)採用儀器介紹

本研究採用 30 個 MoteIV 所產之 Tmote Sky 無線感測器，由代理商識方科技依試驗需求撰寫韌體，無線感測器之主要功能如下：

- 資料自動記錄規格說明如下：
  - 相容於 TinyOS 作業平台。
  - 取樣頻率至少可達 6 秒，並且可於接收伺服器進行調整。
  - 操作電壓範圍介於 2.1V 至 3.6V 之間，並可回傳電力狀況。
  - 除內建感測器外，至少仍有 2 個以上的類比訊號輸入。
  - 資料儲存記憶體  $\geq 1\text{Mbytes}$ 。
  - 當主機無法即時將觀測資料回傳時，資料應含觀測時間而記錄於主機上，並於爾後直接連線進行資料下載。
- 無線傳輸規格說明如下：
  - 合乎 IEEE 802.15.4 規格。
  - 2.45GHz 無須申請合法傳輸頻段。
  - 兩點間於可通視與良好大氣條件下，傳輸距離大於 120m。
  - 具有自動搜尋最佳路線傳輸功能(Multi-hop mesh network)。
- 溫濕度感測器一個，規格說明如下：
  - 溫度感測器(Sensirion SHT15)：
    - ◆ 解析度(resolution): $0.04^{\circ}\text{C}$ 。
    - ◆ 精確度(accuracy): 最佳  $0.3^{\circ}\text{C}(25^{\circ}\text{C})$ 。
    - ◆ 適用範圍包含  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $120^{\circ}\text{C}$ 。
  - 濕度感測器(Sensirion SHT15)：
    - ◆ 解析度(resolution): $0.5\%$ 。
    - ◆ 精確度(accuracy):最佳  $2.0\%(25^{\circ}\text{C})$ 。
    - ◆ 適用範圍包含  $0\%$ 至  $100\%$ 。
- 全日射量感測器一個，反應波段應包含 320nm 至 1100nm。
- 光合作用輻射量感測器，反應波段應包含 400nm 至 700nm。

#### (三)儀器外盒通風筒設計介紹

溫濕度感測器觀測時需有不受太陽直射、通風等條件，才能量測真正的氣溫，因此 Vaisala 公司為其生產的溫濕度感測器設計一個通風筒，以達到上述條件。本次採用之無線感測網路節點僅有一個 IC 板，

後有可裝 2 顆 3 號電池之電池盒，實無任何防潮耐候處理，經與廠商討論，決定在節點之 IC 板上除了感測器外，塗上一層防濕絕緣保護劑。另參考 Vaisala 公司通風筒，並考量未來佈設綁於樹幹之方便性，以壓克力設計一個通風筒。經過半年的測試，期間雖無暴雨，但仍有多天處於高濕度狀態，其防濕耐候效果良好。

#### (四)儀器安裝說明

為使安裝與未來調整容易拆卸，本次研究採用五金百貨行可輕易買到，用於機車束綁使用的伸縮帶。另考慮各節點可能受遊客干擾，最後決定一律放置於離地 3m 的高度，佈設位置則考慮節點訊號可傳回基地站並考慮往銀杏林沿路可接續佈設之點，另參考美國紅木微氣象研究，另在柳杉林裝設 1 個 8.45m 高的節點，銀杏林裝設 1 個 9m、1 個 11m 的節點，用以瞭解不同高度之差異。為避免太陽直射可能的干擾，節點面對的方位儘量朝向北方。由於初次佈設時，僅採用內設天線，此天線具指性特性，而非全向性，綁於樹幹上時，則有半圓訊號遭遮蔽，無法進行傳輸，因此通風筒前方 180 度往前與往後均需有其他節點才能訊號持續傳送，此情況迫使節點必須採用“之”字形佈設，大幅縮短傳輸距離，也將造成末端訊號須跳接更多節點採可將資料回傳等問題。為解決此問題，本研究另於 2 個最大的瓶頸處的節點採用外接式天線，嘗試解決此問題。研究區域佈設分佈由基地站至最遠節點直線距離約 420m。空間便亦分別從從苗圃空曠區、柳杉林、台灣杉林至最遠的銀杏林。

## 四、結果與討論

從 2005 年 11 月 5 日初步安裝完畢起，資料即開始經由無線網路回傳進入資料庫，並依設定程序進行感測器初步率定與無線感測網路系統測試與微調。本章節針對溫濕度感測器率定(calibration)、無線傳輸分析、耗電量分析、氣象觀測資料分析等小節依序說明。

### (一) 溫濕度感測器率定

本研究基本假想即苗圃農業氣象站所量測之溫濕度資料應可為標準值，做為無線感測網路節點感測器比對參考使用。苗圃農業氣象站所量測之溫濕器為 Vaisala 儀器商所生產之 HMP45D，溫度感測器為白金 100Ω 型，在 20°C 時，有 ±0.2°C 的精度；相對濕度有 ±1% 的精度。然而目前氣象站資料輸出最短的頻率僅有 10 分鐘平均值，又因考量此站為重要觀測站，不宜任意更動程式，因此採用此值與各節點每 10 分鐘即時觀測值之間進行比對難免有較大誤差，比對結果 R-square 雖高達 0.937，然而可看出氣溫超過 18°C 時，無線感測網路量測值偏大，且偏差值隨溫度增高而增大，最大誤差竟高達 7 度，兩者似有非線性曲線關係；再看相對濕度，比對結果 R-square 高達 0.969，然而相對濕度愈低，無線感測網路量測值偏有偏低趨

勢。初次率定比對結果，無線感測網路採用之 Sensirion SHT15 看似無法達到該廠商所保證的準確度，然而根據 Sensirion 網站說明，針對溫濕度感測器的率定不宜於具有溫濕梯度環境下進行，容易因環境的不確定性造成率定誤差；本研究另在室內防潮箱所進行的室內率定試驗，因環境密閉，確實可率定出較精確的結果，也初步證明本感測計的實用性，但未來仍將針對感測計逐一進行率定，以確保資料品質(結果如圖 3 及 4)。

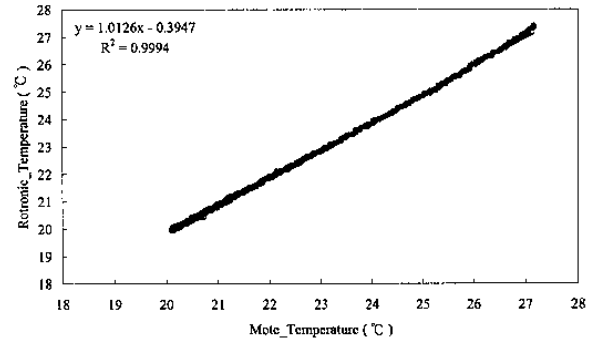


圖 3 溫度室內率定初步成果

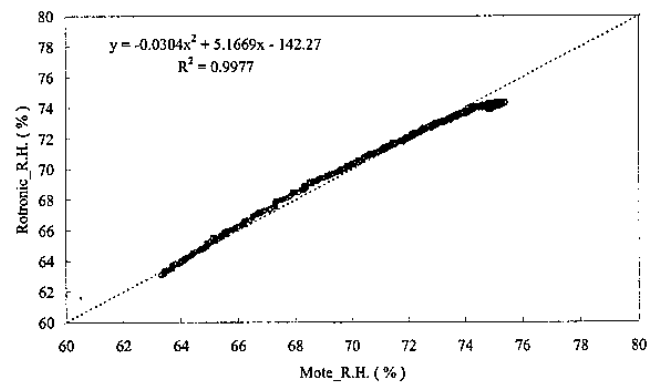


圖 4 相對濕度室內率定初步成果

### (二) 無線傳輸分析

礙於儀器架設初期有較多的調整與韌體修正，因此常有不定時停止觀測一小段時間，無法統計由基地站送出請求量測的確切次數以為回傳次數的基準值，因此採用接收資料最大量之節點為基準，比對各節點的回傳成功比例，經分析發現回傳成功比例與跳接數有明顯呈反比的趨勢(圖 5)，跳接數愈多回傳資料成功率愈低。目前廠商尚未找出確切原因，觀看美國試驗結果，雖效果較佳，但此問題依然存在無法解決，應是 TinyOS 作業平台仍未克服的問題。目前可行的解決方法，即是採用外接天線加強訊號傳輸距離，減少資料回傳的跳接數。此外，每個感測主機皆有 1Mb 記憶體可儲存觀測資料，因此，無線傳輸無法完全回傳觀測資料，則可定期前往現地維護時，另直接連線下載存於記憶體的資料，再行匯入資料庫中。但只要每日有一定的資料回傳，則可利用這些資料的監控確保主機運作情形。

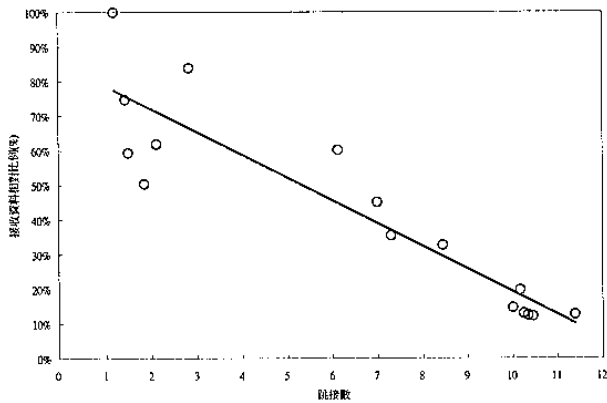


圖 5 跳接數與接收資料相對比例關係圖

### (三) 耗電量分析

本研究採用過美國金頂鹼性電池、Panasonic 大流量鹼性電池、Panasonic 氫氧電池、Toshiba 搖滾鹼性電池以及 Sanyo2500mA 鎳氫充電電池以為電力來源，對無線感測網路節點所能提供之操作電壓從 3.0V 耗損至 2.1V 而言，所能耐用時間幾乎相同，當 6 秒偵測 1 次並回傳資料時，2 顆 3 號電池約可用 7 天，若改為 2 分鐘偵測 1 次並回傳資料時，則可用 14 天。其中，Panasonic 氫氧電池雖號稱電力高於平常鹼性電池 3 倍，從觀測電壓值中確實看到其可維持在 3 伏特的時間較長，一旦電壓低於 3 伏特，電壓則急速降低，對節點的操作特性並無益處，但其價格為平常鹼性電池的 3 倍，為最不划算的一種電池。相對而言，Toshiba 搖滾鹼性電池單顆僅需 9.9 元，較其他鹼性電池平均單顆 14 元便宜約 30%，為鹼性電池中最經濟的一種。再者，Sanyo2500mA 鎳氫充電電池因可重複使用，雖單顆單價達 125 元，若可配合太陽能板，持續充電，將可大幅增加運作時期，且降低電池替換的工時，應為未來在供電上可努力的方向。此外，目前在最遠端之節點換成 1 號鹼性電池，根據耗電曲線確實可有效延長該節點運作時期。

無線感測網路之最低操作電壓關鍵在於溫濕度感測器，雖廠商建議需在 2.47 伏特以上，經測試最低操作電壓應可低至 2.1 伏特。

### (四) 氣象觀測資料分析

初步氣象觀測資料分析，先由農業氣象站資料中選出 2005/12/02 當日全天光輻射量及散射輻射量時序變化無劇烈的散射輻射跳動，代表當日大氣雲量較少，接近碧空狀態，相對而言全日的溫濕度應有較穩定的變化曲線，因此採用此日做為不同林分、不同高度等觀測資料進行比對，應較能看出空間變異所造成的微氣象差異。

圖 6 展現不同林分與空曠地之溫濕度時序變化，觀測結果顯示柳杉林 3m 的中午氣溫較微氣象站低約 2~3℃；夜晚則無太大差異。相對濕度則於白日較微氣象站高約 5~10%。銀杏林放置於 11m 處的氣溫較林內 3m 處高約 1℃。位於銀杏林邊界處之氣溫反應則居兩者之間。台灣杉林內的相對濕度於白日較

微氣象站高約 10%；夜晚則較微氣象站低約 5~10%。

## 五、結論

由於國內運用無線感測網路技術於生態觀測仍屬起步階段，因此本研究針對系統之穩定度、資料回傳成功率、溫濕度感測器觀測可信度、電力耗損程度及在台灣高溫高濕多雨環境下的適用性皆進行評估。結果顯示系統有相當高的穩定度，然而資料回傳成功率偏低，但相信未來所採用的 TinyOS 作業平台應會針對此缺點加以改進，而各節點因有 1Mb 的記憶體，若資料無法成功回傳，仍可暫存於記憶體中，僅需定期前往連線下載即可，對於資料的保存應無太大問題。因此兼用無線網路回傳與各節點自行儲存觀測資料將有利於資料分析與儀器維護。溫濕度感測器觀測可信度上，若參考國外的試驗，應無太大問題，但自行戶外率定狀況不佳情形，代表本研究於未來須對溫濕度感測器再做一次標準率定。電力耗損程度若以目前 5 分鐘觀測一次的頻率計算，應可維持一個月以上，未來可整合充電電池與太陽能板，以延長儀器可觀測時間。至於儀器的耐候性，目前實際測試結果尚屬良好，然未經歷暴雨嚴酷考驗，仍須持續測試。

利用無線感測網路技術可輕易瞭解了不同林分、不同林木高度的溫濕度等微氣候差異，對於進行森林微氣候、林火氣象觀測、物候及植物生理生態等相關研究上，確實是個具有相當潛力的觀測系統。

## 六、參考文獻

1. Batalin M. A., M. Rahimi, Y. Yu, D. Liu, A. Kansal, G. S. Sukhatme, W. J. Kaiser, M. Hansen, G. J. Pottie, M. Srivastava, and D. Estrin, 2004: Call and Response: Experiments in Sampling the Environment. In Proceedings of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems.
2. Buonadonna P., D. Gay, J. M. Hellerstein, W. Hong, and S. Madden, 2005: TASK: Sensor Network in a Box. In Proceedings of the Second IEEE European Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications.
3. Cardell-Oliver R., K. Smettem, M. Kranz, and K. Mayer, 2004: Field Testing a Wireless Sensor Network for Reactive Environmental Monitoring. In Proceedings of the International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing.
4. Cerpa A., J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, and J. Zhao, 2001: Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology. In Proceedings of the First ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean.
5. Chuine I, P Cour, DD Rousseau, 1998: Fitting models predicting dates of flowering of temperate-zone trees using simulated annealing. Plant Cell Environ 21:455-66.
6. Fuchigami LH, M Wisniewski, 1997: Quantifying bud dormancy: physiological approaches.

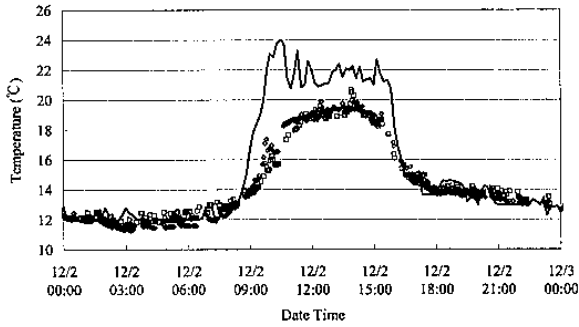
7. Larcher W., 1995: Environmental influences on growth and development. Physiological plant ecology. 3rd ed. Berlin: Springer Verlag pp.309.

8. Mainwaring A., J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson, 2002: Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. In Proceedings of the First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications.

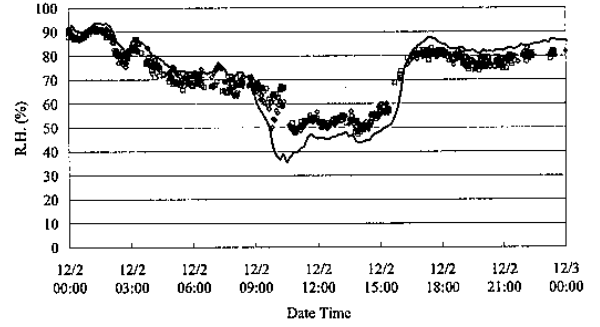
9. Martinez K., J. K. Hart, and R. Ong, 2004:

10. Seeley SD, JL Anderson, JW Frisby, MG Weeks, 1996: Temperature characteristic of anthesis phenology of deciduous fruit trees. Acta Hort 416:53-63.

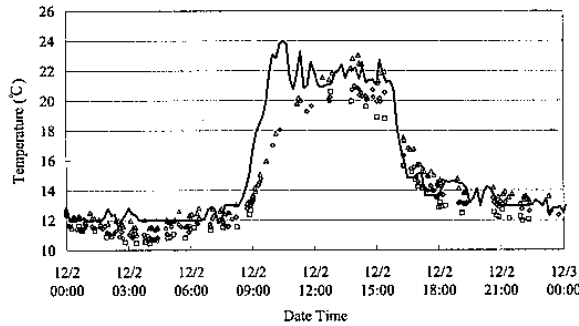
11. Tolle G, J Polastre, R Szewczyk, D Culler, N Tumer, K Tu, S Burgess, T Dawson, P Buonadonna, 2005: A Macroscope in the Redwoods. In Proceedings of ACM Sensys, San Diego, USA.



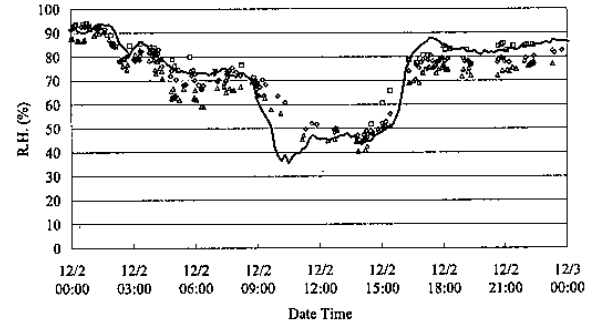
柳杉林氣溫日變化時序圖



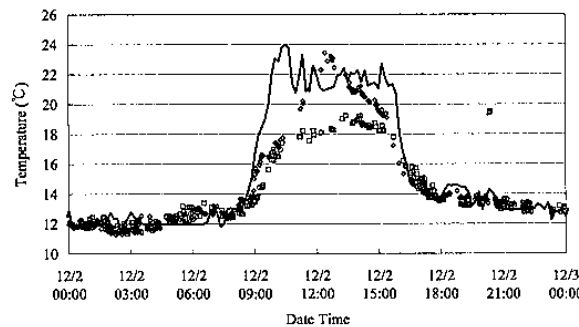
柳杉林相對濕度日變化時序圖



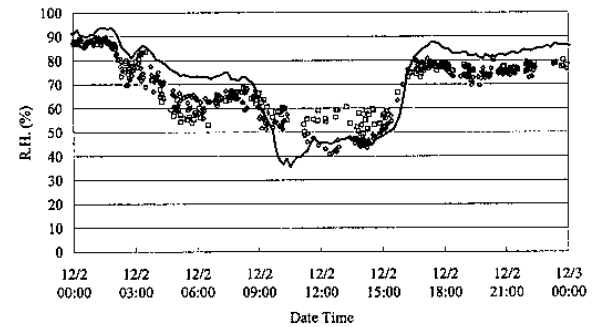
銀杏林氣溫日變化時序圖



銀杏林相對濕度日變化時序圖



台灣杉林氣溫日變化時序圖



台灣杉林相對濕度日變化時序圖

圖 6 溪頭地區三種樹種冬季溫濕度日變化時序圖