

土壤水分感測器之性能研究

Study on the Performance of the Soil Moisture Sensors

國立中興大學農機系副教授

陳 加 忠

Chiachung Chen

摘 要

此研究中在田間測定三型土壤水分計之作業性能。國產的訊號處理裝置用以轉換 Watermark 感測元件之電阻訊號為張力電壓訊號，此裝置具有線性校正功能。研究結果顯示不同機具而來自相同廠商生產之土壤水分計其感測性能並無顯著差異。利用國產之訊號處理設備因具有線性校正功能因此比原廠之 Watermark 感測器有更佳性能。此型水分計之感測土壤張力計之量測值彼此差異範圍為 5-10 cb。耐久試驗結果顯示此型水分計之穩定性。

關鍵詞：灌溉，自動化，感測，控制器。

ABSTRACT

The performance tests for three types of soil moisture sensors were evaluated in the field condition. A signal conditioning device was designed with the linear calibration function to convert the resistance of Watermark sensing element to the voltage values proportional to the tension. The signal processing device also could perform the calibration. The results of this research indicated the same type of soil moisture sensor had no significant difference of its performance. The Watermark element attached with the domestic processing device which had the linear calibrating operation had the better performance than those of the Watermark sensor manufactured by Irrometer factory. The difference between the soil tension with the tension meter and Watermark element attached with domestic signal conditioning device could maintain in the range from 5 to 10cb. The long-term test reveal the stable performance of this sensors.

Keywords : Irrigation, Automation, Sensor.

一、前 言

對於灌溉作業而言，植物-大氣-土壤三者的交互關係構成了影響需水量的三要素。大氣條件如空氣溫度、濕度、日照量等因子決定了蒸散作

用的強度，土壤控制水分的來源，而植物則控制自水源（土壤）至外界（大氣）的傳遞作用。為能正確的評估灌溉需求水量，必須將土壤-植物-大氣三者之關係加以整體性之考慮。因此對於灌溉

作業的監控系統必須量測土壤，作物或大氣的變數，或是三者皆同時量測，由此才能決定最適當的需水量。

土壤水分的量測主要有兩種，量測含水量和量測土壤水分潛勢。含水量以重量或容積比表示，代表土壤中水分含量，而潛勢通常以能量方式加以表達土壤中水分之熱力狀態 (Thermodynamic state)，代表將水自土壤中移走所需能量。兩種量測方式各有其限制，土壤水分無法表示水份輸送至植物體的可能性 (Availability) 亦無法表達水分在土壤內如何運動。而僅以水分潛勢無法表示存在於作物根部附近的水含量。以基勢 (Matric) 代表土壤結構保持水份的能力。土壤水含量與基勢為一特定之函數關係，其對應曲線稱為土壤水分特性曲線。

良好的土壤水分感測器應具有如下條件 (Phene et al., 1971)，(1). 量測範圍廣，(2). 可同時量測土溫，(3). 可執行數據自動記錄，(4). 適合執行自動灌溉作業，(5). 不受土壤之鹽份與其他物性所影響。

土壤含水量的測定有直接或間接法。直接法即代表利用烘箱等設備將水分自土壤中移出，再量測其重量變化量。對間接法而言，由於土壤的特定物性受其水分含量所影響，由對此物性之量測用以探討其水分含量。進行間接法量測時，感測器 (通常利用多孔性物質) 之水分含量主要由土壤中水分的能量狀態決定，假設埋於土壤內的感測器其水分含量與土壤相同，但在實際上此相同性並不存在。近年來常用的技術有 (1). 中子熱化法 (Neutron thermalization method) 與時間區域反射法 (Time domain reflectometry, TDR)。相關之設備與其性能限制由 Baker (1990) 曾加以評論，因價格及使用便利性等因素限制其不能為普遍使用的感測器。

主要的土壤水分量測器有四種：

1. 熱電偶濕度計 (Thermocouple psychrometry)

土壤水潛勢可利用各型濕度計加以量測，最常使用之設備為熱電偶濕度計。此方法最大的困難在於其量測水潛勢全部範圍 (0 ~ -1500 J/Kg) 之對應用相對濕度範圍十分狹窄因此未被普遍利用。此種量測儀器對 RH 微小的變化必須十分敏感，即對溫度的變化十分敏感。量測之訊號需執行運算才能代表土壤水分狀

態：此型設備在應用時有四項問題之限制。(1). 溫度隨時間變化。(2). 溫度梯度的存在。(3). 蒸氣壓梯度存在。(3). 濕球濕度之感測元件其大小，型式變異性大 (Rawlins and Campbell, 1986; Briscoe, 1986)。

適用於田間現地作業之此型設備通常封置於多孔陶瓷杯，以便在泥土中維持一空間避免受土壤污染。杯型之設計重點主要在於消除溫度，濕度的梯度 (Merril and Rawlins, 1979)。因此其材料必須有高熱傳導性 (Campbell, 1979)。目前受推薦利用的設備有 Peltier Psychrometers 或露點濕度計 (Dew point hygrometer) (Campbell et al., 1973, 1974)。在使用之前必須執行良好的校正。

2. 張力計 (Tension meters)

此型水分計目前廣泛的利用量測土壤基質 (Matrix) 潛勢，並且應用於執行於灌溉策略 (Campbell, 1990)。此種設備主要在於量測土壤中水潛勢。此水分計之構造為一具高傳導性的多孔陶瓷材質覆杯，經由小孔的塑膠管或毛細管與壓力量測裝置相連結。量測之前，管徑內注滿水成無氣泡狀態，再放置於土壤中。在水壓力系統達到平衡之時，張力計內的水位假設其基質潛勢與土壤間水分相同。然而此型設備有其量測範圍的限制，其有效性極限為 -80 J/Kg，因此並不適用於乾燥之土壤，此外土壤中的滲透壓不能由此設備加以量測。對溫室栽培而言，Papadopoulos 等 (1992) 試驗以微小型張力計 (長度 5cm) 量測泥炭土介質之水潛勢，認為其性能可用以執行自動灌溉。Wakoh 與 Hirano (1992) 則利用陶瓷材料之張力計探討九種介質水分含量之量測技術。

3. 電阻式水分計

利用電阻變化以量測土壤水分已有百年歷史，此型水分計發展沿革，詳細探討如 Freeland (1989)。最常用的方法是將兩根導線埋置於石膏之內。在石膏與周圍土壤的水分成平衡狀態時，石膏的電阻隨水份的增加而減少其關係為曲線。商品化的量測石膏塊通常具有多孔性，允許少量的硫酸鈣被滲透水所溶解，因此形成一種緩衝體以穩定介質的傳導性。利用一固定的 AC 或 DC 伏特電壓以通過此石膏塊，並以惠斯登電橋等裝置可讀出電阻之變化性。量測輸出所得之電

壓值與土壤基勢具有函數關係存在。此種設備主要有兩項缺點：(1).非線性的特性使其量測範圍僅為適乾至乾之土壤。(2).由於石膏自身的溶解性，在經久灌溉後電阻之變化使量測精確度受到影響，需要經常性校正。Stafford(1988)認為土壤所含成份與電極作用使此電阻量測法無法準確的測量土壤水分含量。

為符合 Phene 等(1971)對土壤水分感測器之要求，近年來 Watermark Model 200 型水分計引起研究人員之重視，此型水分計係以圓柱型多孔膜內裝有顆粒型母體(Particle matrix)，在圓柱中心裝有石膏以阻緩土壤鹽份之誤差性，有兩根電極以同心圓方式埋於圓柱體內用，用以量測電阻。其可量測之土壤張力係自 10 至 200KPa。此感測器之設計問題在於如何線性化電阻與張力的關係，並需要考慮土壤溫度對量測性能之影響。Thomson 與 Armstrong(1987)利用壓力盤與恆溫裝置建立土壤張力與此型感測計之電阻值與土溫之關係函數。Pogue(1988)對此 Watermark 感測器之原理與應用於自動控制之方式有詳細介紹。McCann 與 Kincaid(1991)利用此型感測器執行灌溉自動控制作業，發現其性能合乎要求。與張力計比較，Watermark 感測器之反應速率較緩慢，但是每一灌溉周期的最乾與最濕點一致性良好。McCann 等(1992)以不同的填塞物取代 Watermark 感測器之內部材料，並重新建立土壤張力，感測器電阻與土溫三者之關係方程式，研究結果發現改善填充物質的透水能力可增加反應速率。此型感測器之量測範圍自 0 至 200Kpa，可涵國內土壤之水分張力，因此其性能值得試驗評估。

國內應用的土壤水分計，張力計之售價為數千元，加上訊號轉換器以進行數據整理與控制應用時則成本增加。石膏水分計耐久性較差。近年來，利用電阻原理開發之 Watermark 型水分計已開始為國內使用，其感測元件每具為美金 10-15 元，但其訊號轉換器售價高達美金 500 元以上，因此需要自製訊號轉換裝置以降低成本。

此研究之目的：1.製作電阻訊號處理裝置(Signal conditioning device)以轉換 Watermark 電阻式土壤水分計之電阻訊號為電壓訊號，以便於數據收集與控制應用。並增加線性校正設備以比較線性校正對量測性能之改良。2.比較此電阻式感測器與張力計之性能

特性。3.以 Soilmoisture 張力計為比較標準，探討不同土壤水分計之作業性能，包括反應速率與耐久性。

二、材料與方法

1、土壤水分感測器

此研究中所用之土壤水分感測器共有：石膏電阻水分計、土壤張力計、Watermark 陶製電阻元件與該廠之訊號轉換器、Watermark 陶製臂電阻感測元件與自製之訊號轉換裝置組合而成之感測計。

(1). 石膏電阻水分計

為美國 SoilMoisture 公司產品，量測方式可直接量取電阻變化值或是將訊號傳送線連至該公司生產的顯示器，用以直指示水分狀態。指示值為 0-100%。此外，SoilMoisture 公司提供四種土壤電阻與含水量之關係曲線。

(2). 土壤張力計

為 SoilMoisture 公司產品，此研究中以 15cm 與 30cm 水柱高兩型張力計用以量測兩個不同土壤深度的張力變化。張力變化值可以以儀表直接讀出，也可外接訊號轉換器輸出電流訊號。此試驗中，輸出之電流訊號經電阻線路轉換為電壓訊號加以記錄。

(3). 陶瓷電阻感測元件與同廠訊號處理裝置(簡稱 Wh 型水分計)

此型感測元件為 Irrrometer WaterMark 公司承製，外殼為陶壁薄膜，內部為顆粒樹脂配合石膏圓柱。量測範圍為 500-30,000 歐姆，土壤水分張力相應範圍為 0-2bar。經由該廠之訊號處理裝置(Signal Conditioner, No.2545 型)可轉換為 0.3-5V 電壓訊號輸出。在此試驗中，由電阻訊號轉換為 0-2V 輸出，以方便記錄。

(4). 陶瓷電阻感測元件與自製訊號處理裝置(簡稱 Nh 型水分計)

依 Thomson and Armstrong(1987)之電路設計圖自製訊號處理裝置，將原來 500 至 30,000 歐姆之電阻訊號調整為 0.3 至 5v 之電路，並再輸出訊號(X)端子再增加線性調整電路，原訊號(X)經線性調整 $Y=a+bx$ 後，以調整完成之數值(Y)輸送，使原感測元件之線性化更良好。

2、實驗程序

土壤水分量測實驗於 84 年 6 月至 85 年 12 月於台中縣霧峰鄉萬豐村楊桃果園下進行，各有四型感測計位於二處感測位置(10 公分與 20 公分)。每型每深度各有一支水分計。以數據記錄器(Data Logger, Delta-T 3000 型)記錄土壤水分量測數據，取樣時間為每 5 分鐘取樣 1 次，10 分鐘兩次量測之平均值記錄於微處理機內。依不同時期之量測值以比較水分計之性能。

土壤成份為砂壤土，在此試驗中因氣候之變化(日照、雨量等)而改變含水率，用以提供不同環境以比較水份計之性能。

3、感測性能定義

土壤水分感測器之評估性能定義如下：

- (1). 差異性：以 SoilMoisture 張力計之輸出張力數值為比較基準，用以比較其他感測計之輸出張力值與張力計之量測值差異量。
- (2). 反應速度：觀察感測器在土壤水分變化時，其感測反應速率。
- (3). 持久性：探討使用時間對感測計量測性能之影響，以觀察感測器之老化(Aging)現象。

4、感測計編號說明

為避免各感測器之性能在圖示時混淆，各土壤水分感測器之編號如下：

- (1). T10：Soil Moisture 張力計，位於 10cm 處。
- (2). T20：Soil Moisture 張力計，位於 20cm 處。
- (3). W10：Watermark 感測元件與該公司訊號處理裝置，位於 10cm 深。
- (4). W20：Watermark 感測元件與該公司訊號處理裝置，位於 20cm 深。
- (5). N10a, N10b 與 N10c：Watermark 感測元件與自製之訊號處理裝置，位於 10cm 深。
- (6). N20a, N20b：Watermark 感測元件與該公司訊號處理裝置，位於 20cm 深。
- (7). G10：石膏塊，位於 10 公分深。
- (8). G20：石膏塊，位於 20 公分深。

5、線性校正技術之應用

此試驗中，利用 Soilmoisture 張力計之量測值(T_h)與 Watermark 元件連結自製之訊號處理裝置量測值(N_h)，建立 $N_h = a + b \cdot T_h$ 之直線關係，以 a 與 b 值，利用電位調整方式對 N_h 感測器進行校正作業。

三、結果與討論

1、水分計之量測性能

典型的水分張力計量測性能如圖 1 至圖 3 所顯示。圖 1 中，在 20cm 處之水分計其張力均顯著高於 10cm 處之水分計。土壤之深度愈低，水分量愈少，因此張力愈大，圖 1 結果與土壤水分張力之分佈相符合。在下雨後，因水分迅速滲入土中，使土壤水分飽合，因此張力計之感測訊號為零，代表張力不存在。隨著土壤水分之蒸發張力逐漸增大，由數據記錄值顯示張力計與張力計與 Watermark 電阻水分計之反應速率無時間停滯差(Time delay)。

在 10 公分處之五支水份計其性能曲線如圖 2。張力計訊號 T10 與 Watermark 感測元件配合原廠訊號轉換裝置之訊號 W10 較為接近。而以自製轉換裝置配合 Watermark 感測元件所製成感測器 N10a, N10b, N10c，三者之性能曲線則與張力計訊號 T10 較偏離，差異值約 10-15cb。圖 3 顯示 20 公分處之四支水分計，T20 與 W20 之訊號有 5cb 之差異，另外兩支感測器 N20a 與 N20b，則與 T20 水分計有 10-15cb 之差異值。

由圖 1~3 之比較結果何知，三種型式之水分計，在不同的位置有其相近之感測趨勢，反應速率十分快速。原廠 Watermark 感測器與 SoilMoisture 張力計較接近，差異在 5cb 左右，自製之訊號處理配合 Watermark 元件，其輸出訊號本身十分接近，而與 SoilMoisture 張力計之輸出訊號有 10-15cb 之差異值。

2、水分計感測訊號之相關性

兩具 SoilMoisture 土壤水分張力計，在不同位置之輸出訊號之比較如圖 4。在量測範圍內，兩者有高度相關性，其迴歸方程式如下：

$$T20 = -3.824 + 0.9494 \cdot T10, R^2 = 0.9955, s = 0.56 \quad (1)$$

利用 Watermark 元件與原廠訊號處理裝置所組成之水分計，其輸出訊號 W10 與張力計訊號 T10 之關係

如圖 5。可知兩者水分計之感測值並非直線關係，而是典型曲線。新製之 Watermark 電阻水分計 N10a 與張

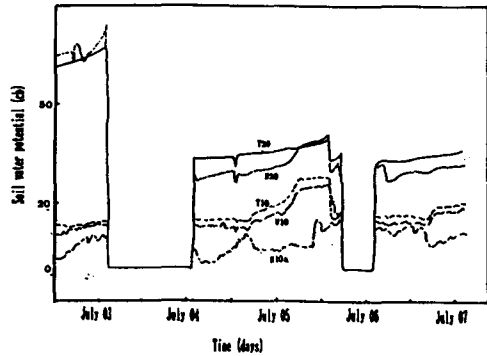


圖 1. 五具水分計於不同深度之量測性能(1995 年)

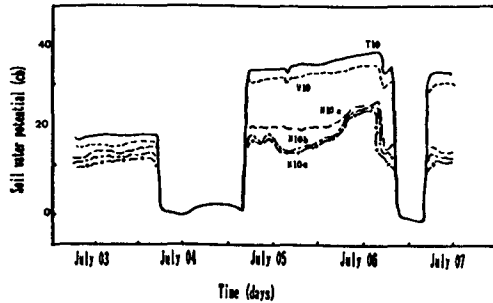


圖 2. 五具水分計於 10 公分深度之量測性能(1995 年)

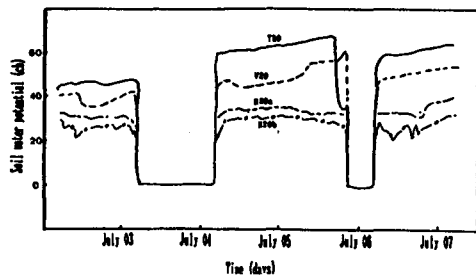


圖 3. 五具水分計於 20 公分深度之量測性能(1995 年)

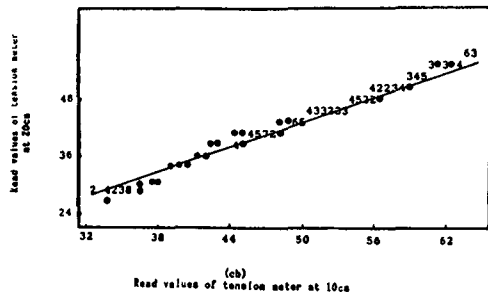


圖 4. 兩具 SoilMoisture 土壤水分計在不同位置之輸出訊號比較

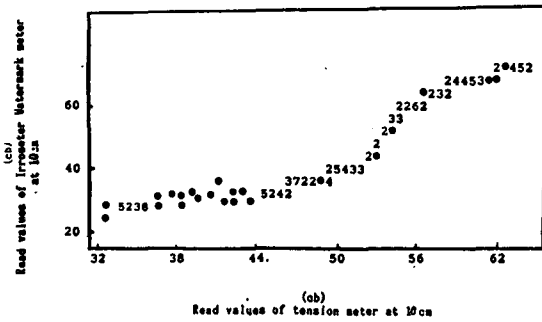


圖 5. 利用 Watermark 元件與原廠訊號處理裝置所組成之水分計輸出訊號與 Soilmoisture 張力計訊號之關係

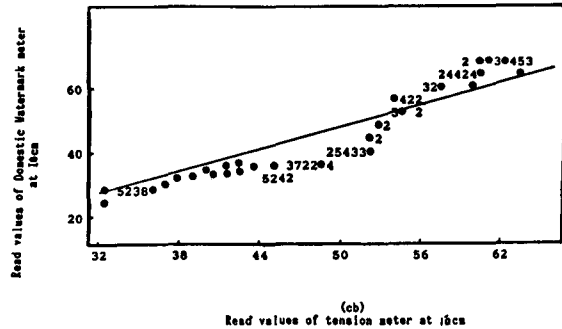


圖 6. 自製之 Watermark 電阻水分計 N10a 與 Soilmoisture 張力計訊號之關係

力計訊號之關係如圖 6。可知，以電阻原理開發而成之感測元件，其輸出訊號與張力計之輸出訊號為明顯曲線關係而非直線相關。針對 40-70cb 之量測範圍，其迴歸公式為：

$$N10a=3.38+0.8925*T10, R^2=0.86, s=4.84 \quad (2)$$

其餘兩支水分計之訊號 N10b, N10c 與 T10 之訊號亦為曲線相關，分別在 40-70cb 範圍建立其關係公式以供校正參考之用。在 20 公分處之水分計訊號，其表現狀況與 10 公分之感測結果相同。

在完成校正公式之後，自製之電阻水分計(N10a, N10b, N10c, N20a 與 N20b)，因為已有線性校正電路裝置，分別依其關係公式，以張力計為基準進行調整，以 N10a 為例，由公式(1)可知： $T10=1.12N10a-3.0$ ，在 N10a 之訊號輸出部份，以電位調整截距(-3.0)與斜

率 $b=1.12$ 進行調整。

3、石膏水分計之量測性能

石膏水分計輸出訊號為電阻值(歐姆)，因此無法與 SoilMoisture 張力計之張力輸出訊號(cb)直接比較差異性。在相同時間下，張力計與石膏水分計之訊號分佈如圖 7。由於輸出單位不同，無法直接比較輸出訊號，但由圖可知其訊號分佈趨十分相近。

張力計輸出值(T10)與石膏水分計輸出值(G10)之比較如圖 8。如同其他電阻元件之輸出訊號(N10 或 W10)，電阻訊號與張力訊號之分佈圖為曲線，並無明顯之直線關係。

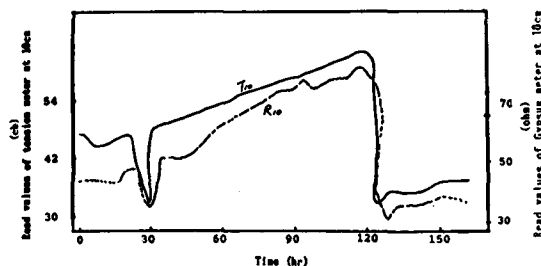


圖 7. 相同時間下，張力計與石膏水分計之訊號分佈關係

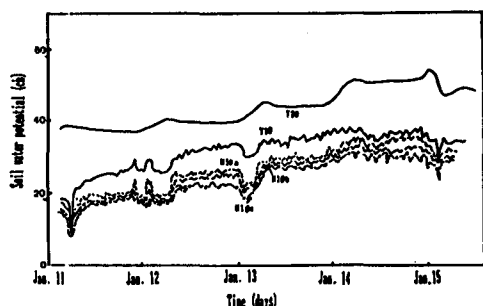


圖 8. 五具水分計於不同深度之量測性能(1996年)

4、線性調整技術對量測性能之改進

自製之電阻水分計均利用線性輸出公式： $Y=a+bx$ ，分別調整斜率與截距。數具水分計之輸出訊號如圖 8 所示。以 SoilMoisture 張力計訊號 T10 為比較基準，經由線性調整技術改良後之感測計 N10a 與 N10b 之訊號十分接近，彼此差異性在 3cb 以內，與 T10 之差異性為 5cb 之內。顯示校正後 Nh 型水分計之量測結果與張力計已極為接近。而原廠之水分計輸出訊號 W10 則

有 10cb 之性能。固定偏離值，顯示原廠 Nh 水分計因電阻元件之老化現象改變量測。

5、各型水分計之持久性

兩具石膏塊水分計之量測訊號(G10)，與張力計訊號(T10)之比較中，在六個月之後反應訊號與張力計之訊號比較如圖 9。其分佈趨勢已不同，其相關係數更降低為 0.9 以下。兩具石膏水分計之電阻訊號相關性也降低為 0.91，顯示在半年之使用期限，石膏塊之電阻反應物性已因使用時間而有顯著變化。使用一年後，四支水分計在 15 公分之量測訊號分佈如圖 10。N10a

與 N10b 水分計之訊號接近張力計 T10 差異性在 3-7cb。W10 型水分計之反應訊號則有較大的變化，差異性較大。在不同位置之量測訊號比較中，T20 與 N20a, T10 與 N10c 均維持相同之分佈趨勢。在 18 個月的使用期限後，張力計與利用 Watermark 元件(Nh 型, Wh 型)之水分計如圖 11 與圖 12。圖 11 顯示在 10 公分的量測位置，N10a, N10b 與 N10c 三具水分計維持相近之量測位置，N20a 與 N20b 維持相近之輸出特性，與 T20 之差異性，原廠 W10 之輸出訊號 W20 變化較大，由圖 11, 12 可知，原 Watermark 公司所製作之訊號處理裝其老化現象比國內自製之設備更嚴重。在 18 個月的持久試驗中，Soilmoisture 張力計與兩種 Watermark 電阻水分計(Nh 與 Wh 型)均無故障現象，訊號輸出均能維持穩定。由以張力計訊號為基準加以比較，其差異值在 8cb 之內，因此對準確性與持久性而言，均可以利用於果園土壤水分長期之監控作業。國內自製之電阻訊號轉換為電壓裝置，其耐久性優於原廠。

四、結 論

此研究中以自製的訊號處理裝置用以轉換 Watermark 感測元件之電阻訊號為張力電壓訊號，此裝置具有線性校正功能。研究結果顯示不同機具而來自相同廠商生產之土壤水分計其感測性能並無顯著差異。利用國產之訊號處理設備因具有線性校正功能因此比原廠之 Watermark 感測器有更佳性能。此型水分計之感測土壤張力計之量測值彼此差異範圍為 5-10cb。耐久試驗結果顯示此型水分計之穩定性。

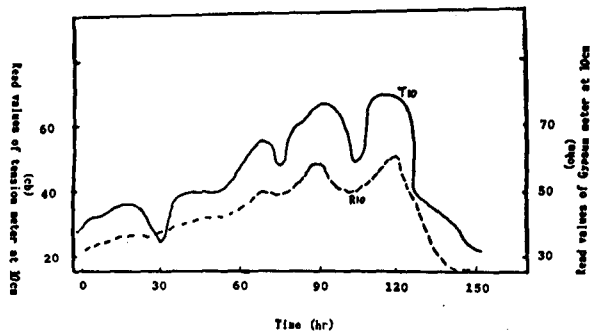


圖 9. 使用六個月後石膏塊水分計與張力計反應訊號比較

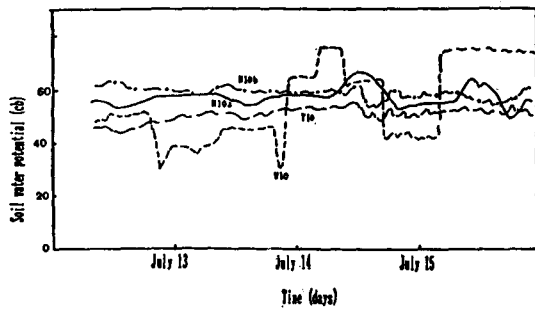


圖 10. 四具水分計於不同深度之量測性能(1997 年)

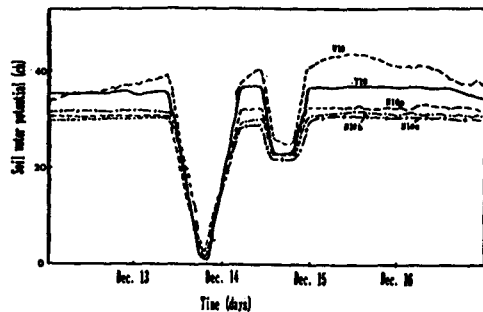


圖 11. 五具水分計於 10 公分深度之量測性能(1997 年 12 月)

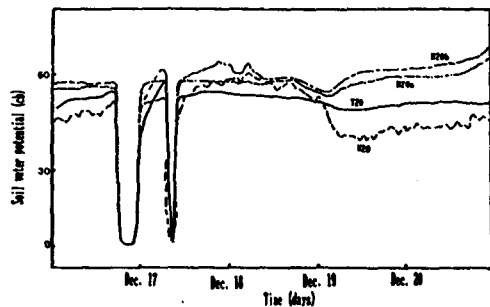


圖 12. 四具水分計於 10 公分深度之量測性能(1997 年 12 月)

五、參考文獻

1. Baker, J.M. 1990. Measurement of soil water content. In "Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions", ed. N.S. Goel and J.M. Norman. Remote Sensing Reviews 5(1). P.263-280.
2. Briscoe, R. 1986. Thermocouple psychrometers for water potential measurements. In "Advanced Agricultural Instrumentation: Design and Use", ed. G.W. Gensler, P.193-209. Martinus Nijhoff Publishers.
3. Campbell, G.S. 1979. Improved thermocouple psychrometers for measurement of soil water potential in a temperature gradient. J. Phys. E:Sci. Instrument 12:1-5.
4. Campbell, G.S. and M.D. Campbell. 1974. Evaluation of a thermocouple hygrometer for measuring leaf water potential in situ. Agron. J. 66:24-27.
5. Campbell, E.C., G.S. Campbell and W.K. Barlow. 1973. A dewpoint hygrometer for water potential measurement. Agric. Meteorol. 12:113-121.
6. Campbell, G.S. 1990. Measuring water potential in soils and plants. In "Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions", ed. N.S. Goel, and J.M. Norman, Remote Sensing Reviews 5(1). P.249-262.
7. Freeland, R.S. 1989. Review of soil moisture sensing using soil electrical conductivity. Trans. of ASAE 32:2190-2194.
8. McCann, I.R. and D.C. Kincaid. 1991. A soil water sensing system for automated irrigation. In "Automated Agriculture for the 21st century", ASAE, St. Joseph, MI.
9. McCann, I.R., D.C. Kincaid and D. Wang. 1992. Operational characteristics of the Watermark model 200 soil water potential sensor for irrigation management. Applied Eng.in Agri. 8(5):603-609.

10. Merrill, S.D. and S.L. Rawlins. 1979. Field measurement of soil water potential with thermocouple psychrometers. *Soil Sci.* 113:102-109.
11. Papadopoulos, A.P., M.E.D. Graham. and B. Actil. 1992. On-line matric potential sensors for irrigation control in peat-based soilless media. *ACTA Horticulturae* 304:227-236.
12. Phene, C.J., D.A. Clark, G.E. Cardon and R. M. Mead. 1971. The soil matric potential sensor research and application. In "Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice"; ed. G.C. Toppetal, P.263-280. SSSA Spec. publ. 30. Madison MI.
13. Pogue, W.R. 1988. Electrical resistance measurement of soil water for controlling landscape irrigation. Third International Drip/Trickle Irrigation Congress. ASAE. Vol.I:66-78.
14. Rawlins, S.L. and Campbell. 1986. Water potential thermocouple psychrometry. In "Methods of Soil Analysis", #9,A.Klute(ed.) Part1:597-633. ASA.
15. Stafford, J.V. 1988. Remote, non-contact and in-situ measurement of soil moisture content: a review. *J.A.E.R.* 41:151-172.
16. Thomson, S.J. and C.F. Armstrong. 1987. Calibration of the Watermark Model 200 soil moisture sensor. *Applied Eng.in Agri.* 3(2)186-189.
17. Wakoh, H. and T. Hirano. 1992. Measurement of water content in solid media using of porous alumina sensors. *ACTA Hort.* 304:253-258.

收稿日期：民國 86 年 07 月 16 日
 修正日期：民國 86 年 10 月 07 日
 接受日期：民國 86 年 10 月 09 日

~~~~~  
 (上接第 110 頁)

- design procedure. *ASHRAE Transactions* 89(2A):78.
19. Tsal, R. J. and H. F. Behls. 1988. Fallacy of the static regain duct design method. *ASHRAE Transactions* 94 (2):78-89.
20. Tsal, R. J. and M. S. Adler. 1987. Evaluation of numerical methods for ductwork and pipeline optimization. *ASHRAE Transactions* 93(1):17-34.
21. Tsal, R. J., H. F. Behls, and R. Mangel. 1988. T-Method duct design. Part I : Optimization theory and Part II : Calculation procedure and economic analysis. *ASHRAE Transactions* 94(2):90-111.
22. Tsal, R. J., H. F. Behls, and R. Mangel. 1990. T-Method duct design. Part III : Simulation. *ASHRAE Transactions* 94(2):3-31.

收稿日期：85 年 4 月 4 日  
 修正日期：85 年 5 月 6 日  
 接受日期：85 年 4 月 29 日