

# 水稻植冠之氣象因素垂直剖面與通量之量測<sup>1</sup>

姚銘輝<sup>2,3</sup> 蔡金川<sup>2</sup> 梁連勝<sup>2</sup>

## 摘要

姚銘輝、蔡金川、梁連勝。2003。水稻植冠之氣象因素垂直剖面與通量之量測。中華農業研究 52:50-61。

本研究是在農業試驗所農場之水稻田區量測水稻植冠氣溫、光度、風速及二氧化碳濃度等垂直剖面變化，同時建立渦流相關系統以量測水田能量項之通量，及不同水分狀態下之能量平衡情形，以提供進行水田耗水或需水量評估之參考。結果顯示，水田白天最高溫度出現在植冠下方，植冠上下相差約 2°C；溼度及二氧化碳濃度則在夜間有較明顯差異，白天差異較小，主要是風速增加空氣擾動使差異減少。水田能量通量的建立是利用封閉比值(可感熱+潛熱/淨輻射+土壤熱流)作為評估指標，本研究中該比值之平均為 0.85。而由(可感熱/潛熱)探討土壤水分狀態影響能量項的變化，當水稻最高分蘗期，土壤張力值約 40 千巴時，潛熱和可感熱的比值逐漸改變。

**關鍵詞：**微氣象、渦流相關系統、蒸發散、封閉比值、鮑溫比。

## 前言

瞭解近地面的微氣象變化是控制或改善作物生長之物理環境的基本知識，同時也是促進生長及提高產量所必備。近地面的主要氣象因子包括輻射量、風速、氣溫、大氣濕度和地表溫度等，但整個微氣候的能量機制無法僅由氣象資料說明，必須量測不同能量的通量(flux)才能對能量產生、傳送及轉換有所瞭解，這些通量包括長、短波輻射，可感熱(sensible heat)、潛熱(latent heat)及向土壤傳導的能量。通量間可相互轉換，例如來自太陽的短波輻射為作物植冠(canopy)所吸收，同時土面及葉表也以可感熱及潛熱的能量方式向大氣傳送，這些轉換過程受表面特性如植生、地形、土壤水分含量等影響，雖然作物生長環境隨大氣環境及作物生長狀態而不同，但仍依循能量平衡的基本學理，而藉由通量的量測，則更能瞭解近地面微氣象的變化。

作物栽培環境能量的平衡可由下式說明：

$$R_n = H + LE + G + Q \dots\dots\dots(1)$$

$R_n$ ：植冠上方之淨輻射通量密度； $H$ ：可感熱通量密度； $LE$ ：潛熱通量密度； $G$ ：向土壤之傳導熱； $Q$ ：熱能儲存。

1. 行政院農業委員會農業試驗所研究報告第 2145 號。接受日期：92 年 3 月 27 日。  
2. 本所農工組助理研究員、副研究員、研究員兼組長。臺灣省 臺中縣 霧峰鄉。  
3. 通訊作者，電子郵件：mhyao@wufeng.tari.gov.tw；傳真機：(04)23338162。

由於熱能儲存項(也就是用於作物行光合作用的部份)佔所有熱量的比例甚微，可予以忽略(Tanner 1960)，因此整個平衡式可寫為

$$R_n + IE + H + G = 0 \dots\dots\dots(2)$$

就上式中四項通量可利用渦流相關系統(eddy correlation system)加以量測，這系統是利用氣象統計上共變異數(covariance)的觀念量測水汽及可感熱的渦流(turbulent)通量(Anderson *et al.* 1984)。其原理為在一合適的平均值期間，由量測因子的波動(fluctuation)變化量，經由相叉相關性(cross correlation)計算通量。平衡式中淨輻射及土壤熱流的通量可用感測器直接量測，而潛熱項是由絕對濕度和垂直風速的共變異數求得(Swinbank 1951)。

$$LE = L \overline{W'X'} \dots\dots\dots(3)$$

L：水汽化之潛熱 ( $J g^{-1}$ ) (常數)； $\overline{W'}$ ：垂直風速之波動值 ( $m s^{-1}$ )

$\overline{X'}$ ：絕對濕度之波動值 ( $g m^{-1}$ )。

水汽通量是利用紫外光分解大氣組成份(水汽及氧氣)的原理量測，量測原理及公式如材料與方法之說明。

可感熱項是由氣溫和垂直風速的共變異數求得(Dyer 1961)。

$$H = \rho C_p \overline{W'T'} \dots\dots\dots(4)$$

$\rho$ ：空氣密度( $kg m^{-3}$ ) (常數)； $C_p$ ：定壓下之空氣比熱( $J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$ ) (常數)； $T'$ ：氣溫之波動值( $^\circ C$ )

雖然利用共變異數方式計算通量的觀念很早就被提出(Dyer 1961; Swinbank 1951)，但在當時因儀器上的限制，很難進行實際量測工作，最近十幾年來，由於電腦運算及儲存速度大幅提昇，才能發展成具有實測功能的系統，應用範圍主要為蒸發散量測(Maitani *et al.* 1986)，也包括不同環境下潛熱或可感熱的傳送等(Mizutani *et al.* 1997；Prueger *et al.* 1998)。

我國水稻栽培面積呈逐年下降趨勢，由民國 51 年 79 萬公頃降至今(民國 90 年)約 33 萬公頃，在加入 WTO 之後，水稻栽培面積將會再減少。水稻的種植除提供糧食外，也對環境生態具有特殊意義，稻田除能涵養地下水源，調節暴雨洪水之尖峰流量外，更能調節微氣候。針對調節微氣候而言，稻田由於長時間湛水狀態，地表熱容量較乾燥之表土大，對於太陽所照射的輻射量具有吸收及調節的功能，當水田蓄水時，淨輻射吸收量大，所吸收熱量大部份透過蒸發以潛熱流方式釋放，因而降低地表(蓄水面)之溫度及可感熱大小，達到調節微氣候之功效。吳&沈(2002)以植物-大氣-土壤模式 PASSM (Plant -Atmosphere -Soil Simulation-Model)建立水田微氣候模式，模擬結果為水稻種植區較鄰近乾旱地區多釋放  $440.8 W/m^2$  的熱能，經換算每公頃水稻田相當於 17 台家用冷氣機之冷房效果。同時水稻的栽培也影響氣候環境，徐&李(1999)統計稻作面積與夏季雷雨日數的關係性，發現稻田面積減少後，夏季雷雨發生的天數也明顯減少，主要原因是水田的蒸發散減少，大氣對流減弱所致。不過，雖然對於水稻和氣象之間有諸多探討，但仍缺乏田間實測資料，尤其是對水田水分利用及分配上，而這部分卻攸關水資源管理及農業用水水費徵收後對農民衝擊程度。

利用微氣象資料進行作物或氣候模式的建構過程中，常將土壤、作物及大氣分為三個層面(layer) (Stull 1998)，其中作物部份受生育階段的影響，尤其是葉片所形之植冠，植冠形成阻擋太陽向地面傳送輻射能量，也影響由地面向天空傳送的長波輻射，而作物本身的株型、葉片型態及葉面積皆會影響植冠形成後對微氣象的改變(Oue 1995)。水稻是我國主要糧食作物，同時水稻栽培對於氣候調節及涵養水源具有永續經營的意義，但針對水田微氣候觀測較少有相關研究，本研究以目前栽培面積較廣之梗稻品種台農 67 號為材料，觀測水稻田垂直剖面微氣象變化，及植冠形成時機及對微氣象的改變情形，同時發展渦流相關系統以取得不同能量形式的通量，以建構水田能量平衡的關係性，作為探討水田蒸發散量及水資源利用的參考依據。

## 材料與方法

### 氣象儀器設置：

觀測地點為台中縣霧峰鄉農業試驗所農場之水稻試區，試區面積約為 0.5 公頃，此塊田區已連續種植水稻 10 年以上，栽種品種為台農 67 號，行株距 15×30 公分，施肥及栽培管理依慣行方式進行。

水稻葉面積是利用植冠分析儀(Licor 2000)所量測，從水稻移植起，固定每週至田區量測一次，量測方法依據羅&林(2000)之建議。儀器準確性之驗證是利用破壞性葉面積資料作比對，資料來源為農業試驗所之水稻豐歉試驗資料，每週取 20 棵稻株，將綠色葉片摘取下來，以葉面積分析儀(Licor 3000)分析每株之葉面積，再依行株距計算出葉面積指數(leaf area index；LAI)。2001 年二期作及 2002 年一期作利用植冠分析儀及葉面積儀所做結果的相關係數為 0.71，而在本研究中葉面積指數是指以植冠分析儀的數據為主。

### 水田微氣象測定儀器：

測定儀器包括全天輻射儀(pyranometer)：Eppley PSP(precision spectral pyranometer)。光度計(quantum sensors)：Li-190SA，測定範圍 400-700nm，每一感測器在使用前以光學輻射校正器(optical radiation calibrator；Licor 1800-02)校正參數。溫濕度計(Hygrothermometer)：Campbell CS 500。風速計(anemometer)：在水稻植冠之上用三杯風速計(MetOne model 014A)，植冠及下方用熱線風速計(Sato, model SK-ATV)。二氧化碳濃度(CO<sub>2</sub> concentration)：以 Licor 6252 二氧化碳分析儀測定，為了能自動記錄不同垂直高度之 CO<sub>2</sub> 量，自製量測控制面板(圖 1)，由繼電器(relay)控制通氣閥門開閉，並由資料收集器(datalogger, Campbell CR10)的控制埠進行閥門的時間控制。

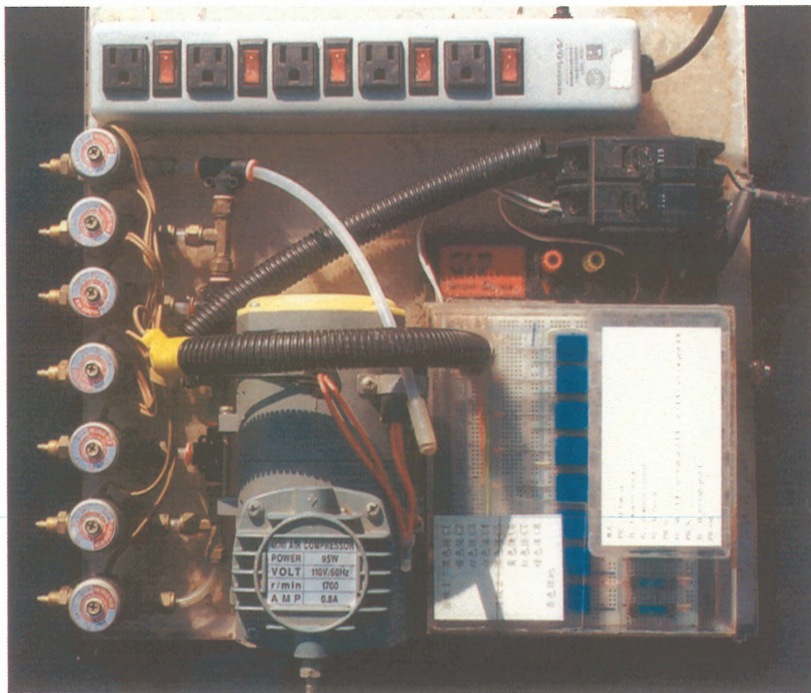


圖 1. 二氧化碳檢測之控制面板實圖。

Fig. 1. Control plate to detect the CO<sub>2</sub> concentration above rice canopy in paddy.

渦流相關系統的建立及儀器配置

儀器配置包括三向音波風速計(three dimensional sonic anemometer)：Young 81000，輸出速度為 4-32Hz。氣濕度計(Krypton hygrometer)：Campbell KH20，反應頻率為 100Hz。細熱電偶線(fine wire thermocouple)：campbell 公司推薦所使用之熱電偶線之線徑為 12.7 μm，反應頻率大於 30Hz，以此線徑可得到最小輻射負載(radiation loading)(Tanner 1979)。土壤濕度計(soil moisture probe)：Campbell CS615。土溫計(soil temperature sensor)：T type 熱電偶線。淨輻射計(net radiometer)：Campbell REBS Q7.1。土壤熱流板(heat flux plate)：Campbell HFT3，埋設深度為 5 公分。所有感測器連接於 Campbell 21x 資料蒐集器，系統程式依 Campbell 公司所提供加以修改，於田間分別組裝二套渦流相關系統可相互校正。

渦流相關系統之水汽通量是利用此外光分解大氣組成分(水汽及氧氣)的原理量測，量測原理及公式如下之說明：

水汽通量是以氣濕度計(Krypton hygrometer)所量測，該儀器放射出之紫外光波段(123.58 及 116.49nm)，此兩波段可同時為水汽和氧氣所吸收，量測公式為：

$$V_h = V_{01} \exp(-xk_{w1}\rho_v - xk_{01}\rho_o) + V_{02} \exp(-xk_{w2}\rho_v - xk_{02}\rho_o)$$

$V_h$ ：氣濕度計之電壓值； $V_{01}$  及  $V_{02}$ ：未吸收兩波段的訊號； $x$ ：氣濕度計之 Path length(cm)； $K_{w1}$  及  $K_{w2}$ ：兩波段水汽的吸收係數( $m^3 g^{-1} cm^{-1}$ )； $K_{01}$  及  $K_{02}$ ：兩波段氧氣吸收係數( $m^3 g^{-1} cm^{-1}$ )； $\rho_v$ ：水汽密度； $\rho_o$ ：氧氣密度。

其中氧氣密度無法直接量測，利用理想氣體定理(ideal gas law)估算，經整理後潛熱值為

$$LE = L_v \frac{\overline{W'(1n V_h)}}{-Xkw} - OC_{LE}, \text{ 其中 } OC_{LE} = L_v \frac{k_0}{-kw} \frac{C_o M_o P}{R} \frac{1}{(W'T')}$$

LE：潛熱通量； $L_v$ ：水份蒸發之潛熱； $\overline{W'}$ ：垂直風速之瞬間偏差(deviation)； $OC_{LE}$ ：潛熱通量之氧氣校正項； $K_o$ ：氧氣吸收係數(常數)( $m^3 g^{-1} cm^{-1}$ )； $C_o$ ：大氣中氧氣的比例濃度(0.2095)； $M_o$ ：氧分子(32)( $g mol^{-1}$ )； $P$ ：大氣壓力(Kpa)； $R$ ：氣體常數(8.31)( $J mol^{-1} k^{-1}$ )； $T'$ ：氣溫之瞬間偏差(deviation)( $^{\circ}C$ )。

本研究將氣象觀測儀器裝置於農業試驗所農場內，配置如圖 2 所示，每一感測器在裝置前皆經校正程序，由於所架設儀器繁多，訊號線的長度控制在 30 公尺以內，以避免訊號的衰減，其中二氧化碳偵測是將矽膠管裝置在不同高度的支柱上，利用資料收集器之控制埠定時分別抽取田區內氣體，而在進入二氧化碳偵測器前先以乾燥劑去除水份。水稻在移植後即進行資料收集的工作。

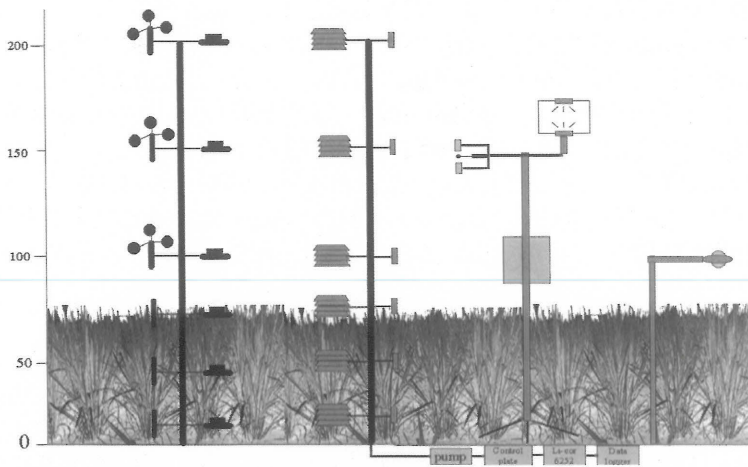


圖 2. 水稻田微氣象及渦流相關系統之儀器配置情形。

Fig. 2. Field deployment of micrometeorological instruments and eddy correlation system.

## 結 果

### 水田微氣象觀測

水稻在不同葉面積指數的生育階段微氣象觀測的結果如圖 3 所示，雖然每一垂直觀測有六點資料，但製圖時為求簡化，僅標示出植冠上方(以 2 公尺資料為主)，植冠間(依據植株高度作調整)及植冠下三部份。微氣象的偵測是連續性，因此僅就有差異的生育階段作標示。氣溫變化是以接近地面最高，越往上方因受風的影響而遞減，但此種垂直剖面的差異僅限於太陽照射時段，上下溫差約在 2°C 左右，到夜晚則溫度差異較小。水稻植冠及下方之相對濕度變化夜間維持在 90-100% 間，2 公尺的觀測值明顯偏低，白天雖以植冠下方較高，但植冠間的差異甚小。光度則是較明顯探討植冠形成的指標，LAI 1.56 時，尚未形成層面，植冠因葉片吹拂而遮蓋感應器，數值較低且變化大，LAI 2.45 時，植冠下方的光度明顯偏低，至 LAI 3.24 時，整個植冠上、中及下的層面形成，這也可由植冠及其下方之風速幾乎呈靜止狀態而說明。

水稻田間二氧化碳變化僅取 LAI 3 生長階段之日變化值做說明(圖 4)。二氧化碳變化和風速有明顯關係，白天風速大，植冠垂直分佈間的差異甚小，濃度約在 350-400  $\mu\text{L L}^{-1}$  之間，至夜晚風速小，減少風擾動的影響，植冠間因葉片行呼吸作用及二氧化碳分子量較大，不易往上層擴散之故，植冠上下相差約在 50-100  $\mu\text{L L}^{-1}$  之間，這種現象在不同生育時期或葉面積指數皆有相近的結果。

### 渦流相關系統校驗及量測

水田能量通量是以渦流相關系統量測，圖 5 為向上傳送能量之潛熱及可感熱的裝置，另外，整個水田能量平衡尚包括向下傳送能量之淨輻射量及土壤熱通量兩項。圖 6 為 2002 年 4 月 2 日至 11 日間水田能量項之變化，通量較低時向下及向上能量呈線性關係，通量高時則差異較大，不過，大體上可維持平衡狀態。事實上，可用兩者的比值(即  $R_n+G / IE+H$ )表示，一般稱為 closure ratio。Kizer & Elliott(1991)認為 closure ratio 值可容許範圍為 0.7-1.3 之間，將圖 7 資料重新計算之 closure ratio 平均值為 0.85，且日夜變化均在容許範圍內，表示本研究所建立之渦流相關系統是可反應水田能量的變化。

在系統確定能準確量測通量後，利用兩組渦流相關系統於同一時間量測不同水份狀態下水田能量收支情形(圖 7)，取樣時間為 4 月 28 日。圖 7-A 為灌水之能量收支和 B 乾燥環境(水份張力為 40 centibar)相較有較高的潛熱，可感熱及土壤熱流相對較低。當然，整個水田能量來源為太陽輻射，包括潛熱、可感熱及土壤熱流的日變化皆與淨輻射一致，上午 10 時後，土面溫度的升高，潛熱及可感熱急速升高，在正午至下午 2 點間各種通量達到最高值，至下午 5 時則迅速下降。

由圖 7 結果可知土壤含水量影響潛熱及可感熱的通量，而圖 8 是利用潛熱和可感熱的比值，一般稱為鮑溫比(Bowen ratio)和水田土壤含水量的關係性。水稻灌水狀態下，往上傳送的通量中，潛熱佔 80-90%，其餘為可感熱部份，隨土表灌水及土層中水份減少，太陽輻射加熱對象的比重由地表水份轉為空氣，此時，可感熱比重增加且潛熱降低。由於本研究中並非在田間進行乾旱處理，僅是將水稻生育時期所連續記錄之資料加以整理，水稻在生育過程中雖以灌水環境居多，但在最高分蘗期會減少灌水，使土壤中水份含量最低至地面龜裂(曬田)，此時水份含量約為 90 centibar，鮑溫比的比值約為 0.8，顯示水田往上能量以可感熱傳送增多，事實上，在 40 centibar 時，兩種能量的比值即逐漸改變。

## 討 論

本試驗量測時間為 2002 年一期作，此段時間適逢全國性旱象，水稻田的用水完全來自於灌溉用水，同時長時間高日射量的天氣型態，整個大氣條件較為穩定，因此，圖 3 中三種葉面積指數之生育階段，白天最高溫皆在 34-35°C 之間，日射強度最高值約在 2000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。農田微氣象垂直變化受作物生長情形、太陽輻射強度及亂流交換狀況的影響，以溫度垂直分佈而言，白天溫差約為 2°C，然

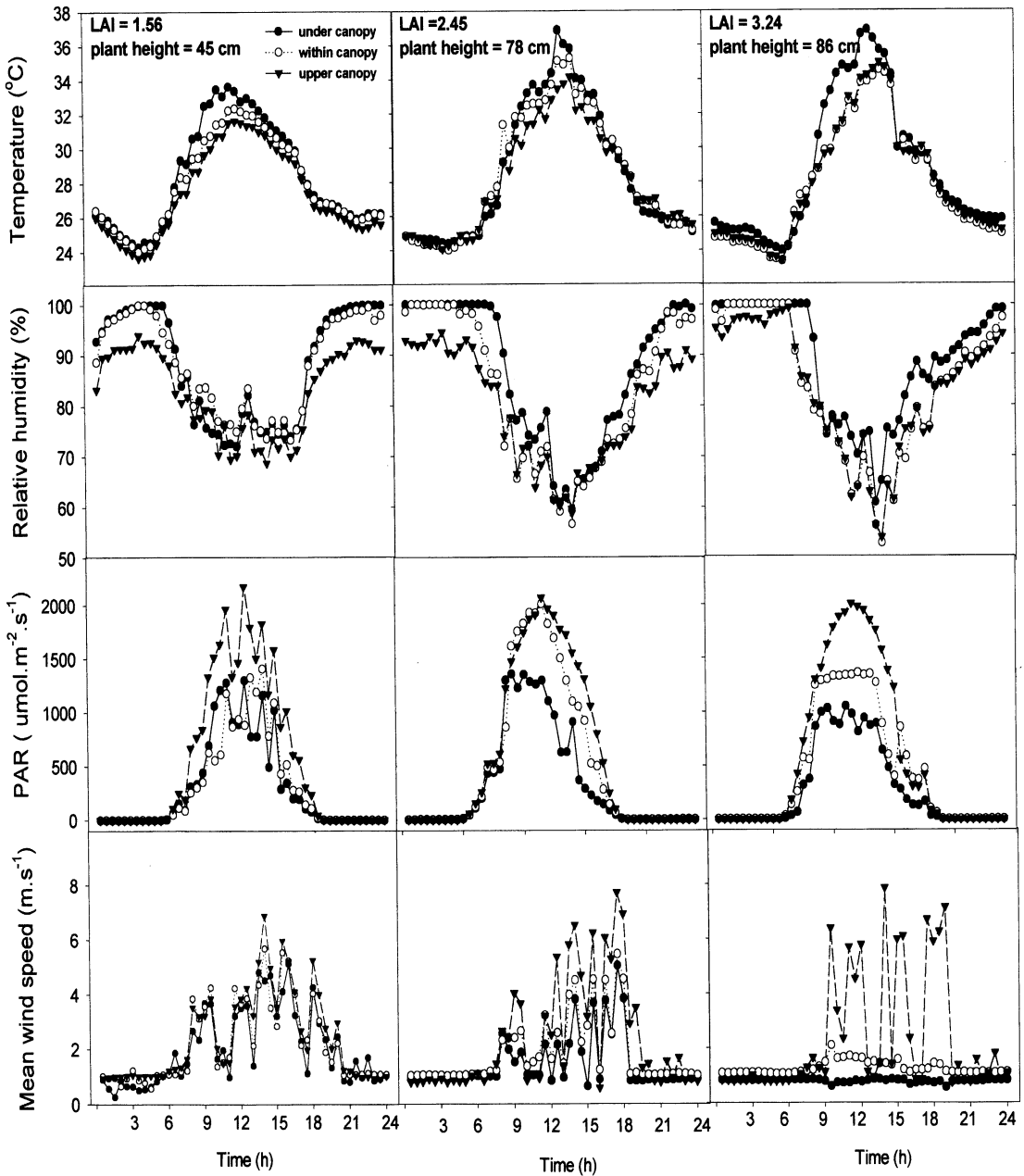


圖 3. 水稻不同生育時期植冠垂直剖面之氣溫，相對溼度，光度和平均風速之日變化。

Fig. 3. Diurnal change of vertical profile on air temperature, relative humidity, PAR ( photosynetical active radiation) and mean wind speed for rice canopy during the different growth stage.

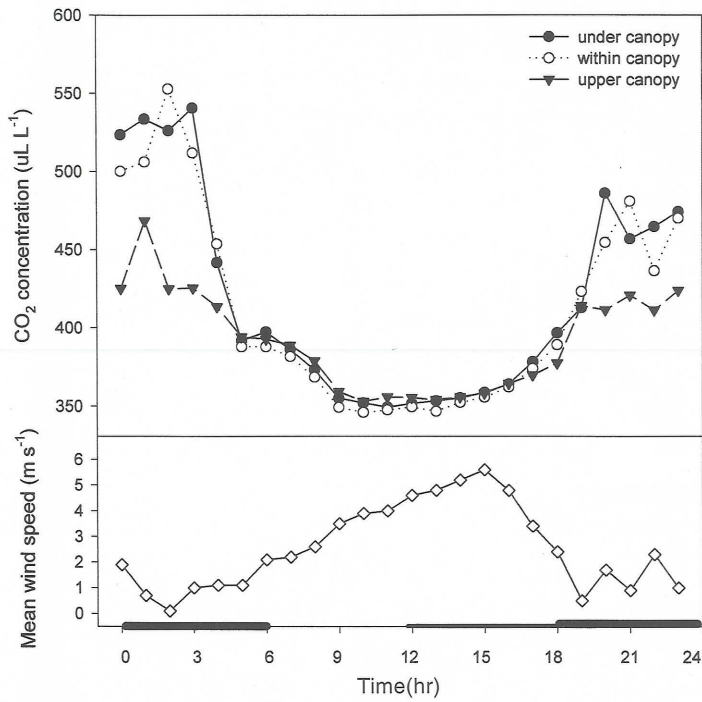


圖 4. 水稻植冠垂直剖面之二氧化碳濃度及平均風速之日變化。

Fig. 4. Diurnal change of vertical profile on CO<sub>2</sub> concentration and mean wind speed for rice canopy during Calendar day 124, 2002. The black bar was night period.

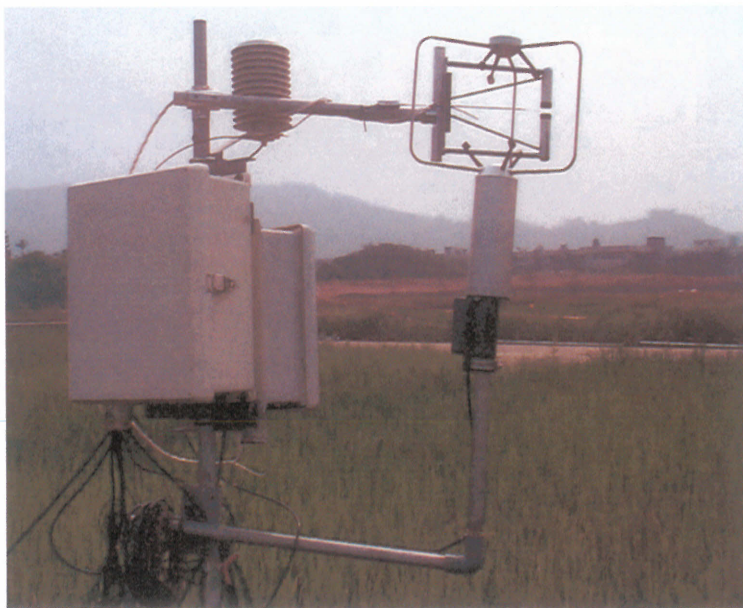


圖 5. 水田群落上方偵測垂直風速及絕對濕度偵測情形。

Fig. 5. Field layout to detect the vertical wind speed and absolute humidity above rice canopy in paddy.

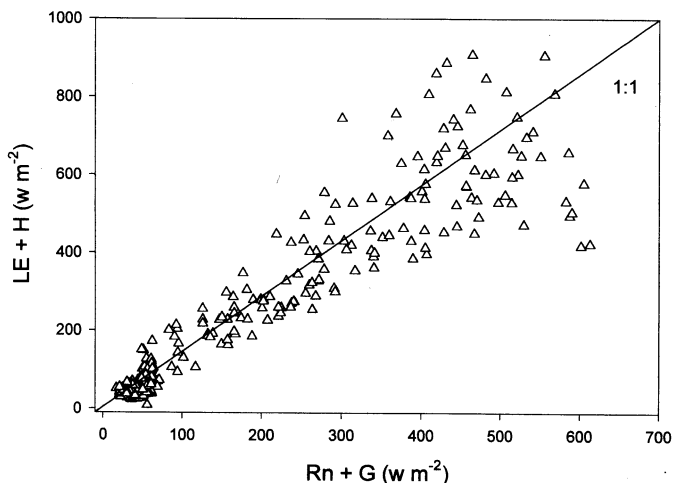


圖 6. 水稻田潛熱+可感熱對淨輻射+土壤熱流半小時平均值之相關性。

Fig. 6. The half-an-hour average turbulent flux for LE+ Hvs. Rn+ G in field observed during Calendar Day 122-135, 2002.

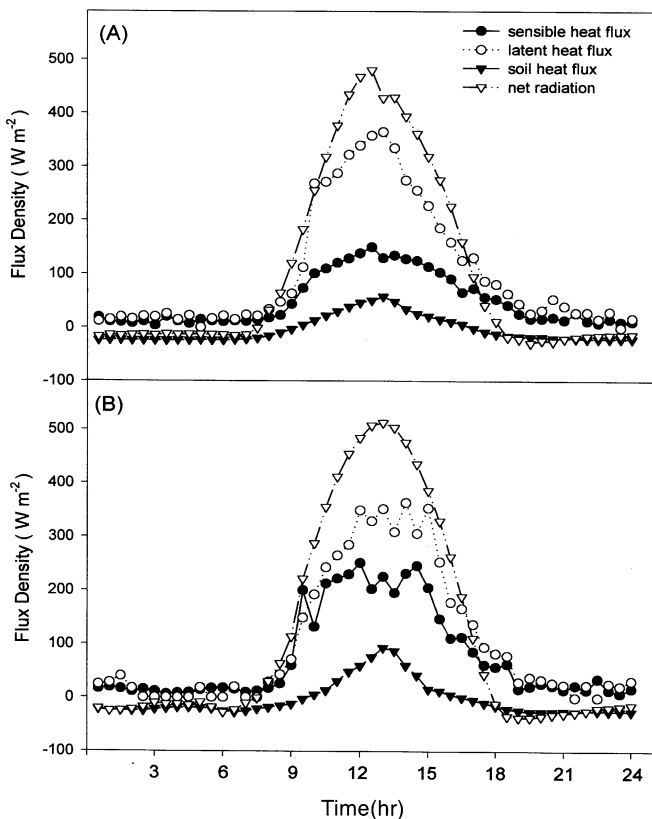


圖 7. 水稻田澆水及非澆水的土壤狀態下能量平衡情形。

Fig. 7. Energy balance components for irrigated (A) and nonirrigated (B) soil situation in paddy field during Calendar Day 128, 2002.

而 Maitani 等人(1986)所觀測高粱植冠溫差約 3-4°C，這和土壤含水量有關，一般水田溫差會較旱田為低，至於夜間，因長波輻射冷卻而降溫，不過植冠間差異甚小，至於其他微氣象因素由圖 3 及圖 4 可發現，微氣象垂直剖面的變化受水平風速(造成空氣擾動)影響，包括相對濕度和二氧化碳濃度的變化皆屬之，白天風速強形成植冠上下渦流擾動，不同高度間的垂直差異甚小，至夜間因風速減弱，包括地面水汽及葉片所排出二氧化碳往上传送減少，植冠間垂直分布的差異性出現。

水稻生育初期，分蘗數及葉片所伸長面積較小，無法覆蓋所生育的區域，由上往下俯視，可區分地表及葉面，此時地面蒸發大於葉片的蒸散，而整個潛熱主要以太陽光對地表水份加熱為主，隨生育時間的增長，覆蓋面積及植冠結構增厚，地面為葉面所覆蓋，此時，葉片蒸散所佔潛熱比重增加，雖然就水稻耗水而言，蒸發或蒸散並無區分的必要，但在建構蒸散模式以估算耗水量時，包括葉面積、葉片蒸散(或氣孔導度)及蒸發皿皆是模式建構所需的基本資料。由圖 3 結果可知，水稻台農 67 號葉面積指數為 2-3 間，植冠垂直分布的差異明顯改變，葉片所形成植冠除減少上下對流外，同時也意味蒸散取代蒸發，當然在水稻生育後期會因葉片黃化而降低葉面積，但此時對於水分需求較少，本研究並未探討這部分。

Brutsaert(1982)認為渦流相關系統應具有感測器的反應時間夠快，平均時期夠長及偵測速度精確等條件。本研究中系統取樣間距為 0.1 秒(10Hz)，每 10 分鐘取一次平均，當然這無法量測全部之渦流(eddy)，但依據 McBean(1972)的分析，不論提高或降低反應頻率對於偵測量差異不到 1%，而 Bosveld & Beljaars(2001)以 0.1, 0.2, 0.4, 1.0, 2.0 及 4.0 秒之取樣間距也認為取樣速率不影響通量的量測。雖然由圖 6 的 closure ratio 資料說明系統的量測具有準確性，但在量測過程仍有需克服之處，其中包括氦溼度計無法在高濕的環境(尤其是降雨)操作，在儀器說明書有特別註明，同時 Kizer & Elliott (1991)也提供檢測訊號輸出是否正確的方法，但實際在田間操作很難降雨前立即停止偵測，因此，整個量測時程內會有燈泡損壞及訊號錯誤的情形。此外，Kizer & Elliott(1991)也指出音波風速計在降雨時應注意短路情形，不過在本研究過程中尚未發生。E type 熱電偶線依據 campbell 公司之渦流相關系統所用線徑為 12.7 $\mu$ m，反應頻率大於 30Hz，但這種線徑非常容易斷裂，水田環境無法量測，本研究中改用 0.003 英吋之熱電偶線，當然這可能無法符合最小輻射負載的要求(Tanner 1979)。雖然其他儀器，包括淨輻射計、土壤熱流板及土壤溼度計等皆能穩定操作，但上述偵測潛熱及可感熱通量的儀器，受限於田間

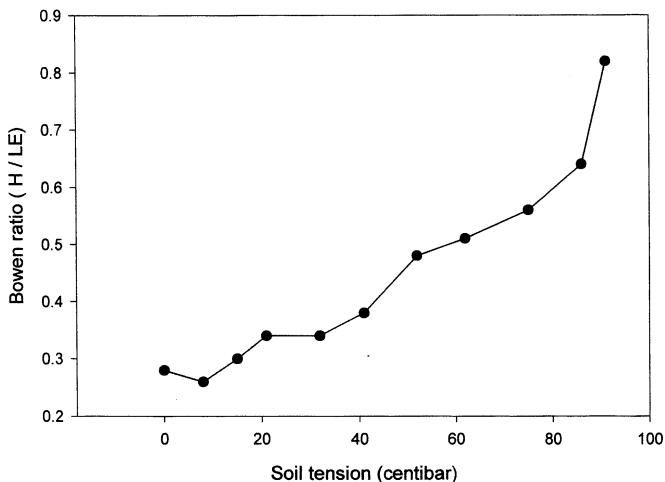


圖 8. Bowen ratio 和水稻田水分張力的關係圖。

Fig. 8. Relationship of Bowen ratio (H / LE) and soil water tension in rice field observed during Calendar Day 122-135, 2002.

環境而無法連續紀錄，尤其是降雨及降雨後數天的資料更容易遺漏。Mizutani 等人(1997)以音波風速計量測森林降雨時之蒸散量，發現降雨時較降雨後之蒸散量大，因此針對降雨時水分消耗及蒸發散部分，尚需利用其他方式量測。

針對渦流量測的環境必須是相當嚴謹，本研究仍有需探討之處，主要為量測田區吹風距離(fetch)的影響，不同田間狀況所需的吹風距離不盡相同。Heilman 等人(1989)以多組鮑溫比感測器放置在不同高度及吹風距離以量測蒸散旺盛之牧草及棉花田，結果認為 fetch-to-height ratio 至 20:1 的準確性仍可接受。Stannard(1997)則認為渦流相關系統在相同條件下應比鮑溫比有更大的吹風距離，而一般認為比值應為 100:1 可避免植冠非均一性及風向的干擾(Kanemasu *et al.* 1979 ; Rosenberg *et al.* 1983)。但由我國現行水稻栽培情形，經土地重劃後的田區塊面積為 0.25 公頃，即 25×100 公尺，以水稻栽培株高 1 公尺計算，所需吹風距離為方圓 100 公尺的範圍，試區中必需避免田埂及道路的影響，很難找到合適的量測地點，解決方法可提高偵測取樣之速度及改變儀器架設的高度，但另一角度思考，水稻植冠層面均一，粗糙度(roughness)低，是否需要 100:1 的條件也可依據 Heilman 等人(1989)的方式進行探討。

## 結 論

傳統農業遭受最多批評之處，在於使用了與產值不成比例的自然資源，包括土地及水資源。水稻田是我國農地所佔面積最大，同時也是水資源利用最多之作物，水稻田用水除部份供植體吸收利用外，大部份以蒸發散方式排於大氣中，但目前對於水田蒸發散量所耗損水量缺乏適當方法作精確估算，常造成灌溉管理上需水量估計錯誤，影響水源分配及造成政策制訂上的盲點。

究竟一塊田區在水稻生育期間需要多少水？這個問題到目前為止仍沒有明確答案，過去研究都以模式估算，例如利用作物微氣象變化或氣候資料相關關係式來估算作物需水量，但大多以旱作物為主。陳 & 甘(1997)利用氣候資料針對我國十個主要地區進行水稻需水量的估算工作，但所用 Penman-Monteith 估算法仍是以旱田作物所發展出來的模式，加上並沒有田間實測值，因此無法驗證。本研究目的為實測水田微氣象變化，同時建立田區能量平衡項的量測系統，尤其著重於水汽通量部分，希望能以實測方式提供更具說服力的數據，然而在試驗過程仍有需探討之處，例如吹風距離及高濕環境造成量測盲點的問題，當然如果以整個水資源利用而言，尚包括水稻田進出水量的監測、整個水稻生育期的蒸發散量，及土壤入滲問題等，皆有待更進一步的量測。

## 誌 謝

試驗過程中有關二氧化碳偵測控制面板之設計與開發，受曾經服務於本所之李孟穎及江昭謀兩位先生的盡心協助，在此特表謝忱。

## 引用文獻

- 吳富春、沈易徵。2002。水田微氣候模式之建立與應用。農業工程學報 48:10-23。
- 徐森雄、李錦育。1999。台灣地區雷雨日數與稻作面積關係之探討。中華農業氣象 6:1-6。
- 陳清田、甘俊二。1997。台灣地域性作物需水量之推估研究。農業工程學報 43:1-18。
- 羅正宗、林俊隆。2000。利用植冠分析儀測定水稻葉面積指數之標準規範。中華農藝 10:13-21。
- Anderson, D. E., S. B. Verma and N. J. Rosenberg. 1984. Eddy correlation measurement of CO<sub>2</sub>, latent heat, and sensible heat fluxes over a crop surface. *Boundary Layer Meteorol.* 29:263-272.

- Bosveld, F. C. and A. C. M. Beljaars. 2001. The impact of sampling rate on eddy-covariance flux estimates. *Agric. For. Meteorol.* 109:39-45.
- Brustsaert, W. 1982. *Evaporation into the Atmosphere*, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Holland.
- Dyer, A. J. 1961. Measurement of evaporation and heat transfer in the lower atmosphere by an automatic eddy-correlation technique. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 87:401-410.
- Heilman, J. L., C. L. Brittin and C.M.U. Neale. 1989. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat flux. *Agric. For. Meteorol.* 44:261-273.
- Kanemasu, E. T., M. L. Wesley, B. B. Hicks and J. L. Heilman. 1979. Techniques for calculation energy and mass flux. p.156-182. *In* : *Modification of the Aerial Environment of Crops*. (Barfield, B.J. and J.F. Gerber. eds.) St. Joseph, MI : ASAE.
- Kizer, M. A. and R. L. Elliott. 1991. Eddy correlation systems for measuring evapotranspiration. *Trans. ASAE* 34:387-392.
- Maitani, T., T. Seo and K. Sahashi. 1986. Measurement of vertical profiles and fluctuations of air temperature within and above a sorghum canopy. *Agric. Study* 61:19-27. (in Japanese with English Abstract).
- Mcbean, G. A. 1972. Instrument requirements for eddy correlation measurements. *J. Appl. Meteorol.* 11:1078-1084.
- Mizutani, K., K. Yamanoi, T. Ikeda and T. Watanabe. 1997. Applicability of the eddy correlation method to measure sensible heat transfer to forest under rainfall conditions. *Agric. For. Meteorol.* 86:193-203.
- Oue, H. 1995. Study on characteristics of heat balance and estimation of evapotranspiration in the complex land use region. *Mem. Coll. Agric. Ehime Univ.* 40:1-90. (in Japanese with English abstract).
- Prueger, J. H., T. J. Sauer and J. L. Hatfield. 1998. Turbulence flux estimates of sensible and latent heat near shelterbelts during low wind conditions. *Trans. ASAE* 41:1643-1650.
- Rosenberg, N. J., B. L. Blad and S. B. Verma. 1983. *Microclimate: The Biological Environment*. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley and Sons. New York. 335 pp.
- Stannard, D. I. 1997. A theoretically based determination of Bowen-ratio fetch requirements. *Boundary Layer Meteorol.* 83:375-406.
- Stull, R. B. 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorol.* Kluwer Academic Publishers, Boston. 666 pp.
- Swinbank, W. C. 1951. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *J. Meteorol.* 8:135-145.
- Tanner, C. B. 1960. Energy balance approach to evapotranspiration from crop. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24:1-9.
- Tanner, C. B. 1979. Temperature: Critique I. P.32-49 *In*: *Controlled Environment Guidelines for Plant Research*. (Tibbitts T.W. and T.T. Kozolowski. eds.) Academic Press. New York.

# Measurement of Vertical Profiles and Fluctuations on Agrometeorological Factor within and above a Rice Canopy<sup>1</sup>

Ming-Hwi Yao<sup>2,3</sup>, Jin-Chuan Tsai<sup>2</sup> and Lien-Sheng Liang<sup>2</sup>

## Summary

Yao M. H., J. C. Tsai and L. S. Liang. 2003. Measurement of vertical profiles and fluctuations on agrometeorological factor within and above a rice canopy. *J. Agric Res. China* 52:50-61.

Vertical profiles of air temperature, light intensity, relative humidity, wind speed and CO<sub>2</sub> concentration were observed within and above a rice canopy in paddy field of Taiwan Agriculture Research Institute. In order to evaluate the reasonable irrigation water requirement in paddy field, the eddy correlation system has been established, not only to detect energy fluctuation, but also to evaluate the energy balance with different soil water condition. The results indicate that the temperature profiles within and above plant canopy exhibited remarkable diurnal variations, the difference of temperature was 2°C. In the daytime, the maximum temperature was observed within the plant canopy. The relative humidity and CO<sub>2</sub> concentration within and above plant canopy were significant different during night period, however, the difference during day time were not significant because the wind increased the air turbulence. The surface energy balance equation was used the closure ratio ( the ratio of sum of latent and sensible heat fluxes to the sum of net radiation and soil heat flux) as the evaluated index. In our study the average of closure ratio was 0.85. Bowen ratio(sensible heat / latent heat)was used to evaluate the change of energy component on the soil condition of paddy field, the results showed this ratio will be changed when soil tension was 40 centibar during the maximum tillage stage of rice.

**Key words** : Micrometeorology, Eddy correlation system, Evapotranspiration, Closure ratio, Bowen ratio.

- 
1. Contribution No.2145 from Taiwan Agriculture Research Institute, Council of Agriculture. Accepted : March 27, 2003.
  2. Respectively, Assistant Researcher, Associate Researcher, Researcher and Head, Agricultural Engineering Division, TARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.
  3. Corresponding author, e-mail : mhyao@wufeng.tari.gov.tw ; FAX : (04)23338162.