溫室內溫度與濕度控制模式

王鼎盛　邱文山*
台灣大學農業工程學系

摘　要

溫室內環境包括光、溫度、濕度、氣壓及風速等之氣候環境及噪音、空氣組成、土壤、生物、放射能等非氣候環境。而以良好的設施與管理作出適宜作物生長之溫度環境，乃為設施園藝之第一步，良好的設計則要有模式可為依據。本研究之目的即在建立溫室內溫濕度控制之模式，利用穩定狀態下熱傳遞與質量傳遞的理論，參考作物生理對溫度之蒸發蒸散反應，用數理方法建立溫室內溫濕度管理之依據，並以本省歷年之氣候資料及蒐集之本省常見溫室型態，模擬溫室內溫、濕度之變化，來建議一最經濟而適當的通風及加溫、冷卻量。

本模式之特色是摒除利用外加感應器應答資料輸入之方式，完全以氣象局之氣象報告，配合數理模式來模擬出溫室內之溫濕度環境，雖然直覺上利用感應器精度較好，但精確的數理模式才是可長期信賴的，且本模式重點在預測，可在極短時間內模擬出一天中溫室內溫濕度之變化情形，並提供溫室內土壤溫度變化資料，且轉換成所需之能量輸出，以便作為溫室管理及附屬設備設計之準繩。節省感應器之經費、操作之簡便是推廣的利器，可為將來溫室自動化奠定良好數理基礎。

本研究之模式除用以模擬預測未來溫室內溫度與濕度，提供溫室之管理預防應變措施外，並可為改善現有溫室、通風、加熱及冷卻之依據，對於溫室更改植物種類時可給予評估，溫室之新建可給予正確的興建準繩，為方便環境控制設計上實際應用，本模式已繕寫成FORTRAN程式以資推廣與使用。

一、前　言

本省隨著國民生活水準的提高對各項園藝作物之需求及品質要求亦隨之提高，而作物之生長與其生長環境息息相關，然若在自然環境下生長，夏季高溫多濕、颱風豪雨頻傳，冬季則有間歇性寒流來襲，春季梅雨連綿；因環境氣候影響，造成生產不穩品質不易控制、產期過於集中、市場飽和、價格下跌、淡季供應不足價格昂貴及喪失商品價值，因此採用各項設施來改善園藝作物之生長環境，以控制提高產量、品質，並調節產期之集約栽培，此新興之專業栽培技術稱之為『設施園藝』(1)。

* 國立台灣大學農業工程學系副教授及研究生

園藝設施是幫助作物栽培之掩蔽物與一般房屋不同，具有以下之特質：

Ⅰ．作物直接在栽培床或地面生長，故不需樓板。

Ⅱ．設施內作物需日照以行光合作用，故設施內之屋面及牆面應儘量使有效光透過，骨架亦應採纖細者以免阻蔽光線透入。

Ⅲ．溫室之建造目的雖與一般房屋不同，但承載同樣之載重，且一般而言，溫室之本身重量較輕，故容易被風吹浮，因此其抗風性較需考慮。

由於溫室具有以上之特質，溫室內溫濕度環境在外氣候之變化下，形成一特殊之微氣候環境，其影響之諸因子如下[1]：

Ⅰ．外氣候：

太陽位置（高度、方位、日長）

大氣透過率（直達、天空、全天日射量、波長組成）

氣溫、濕度、風（風速、風向）、降雨（量、強度）

空氣組成（CO_2濃度）

Ⅱ．構造及設備：

方位、緯度、形狀（長寬高、屋頂斜率及形狀、棟間距、連棟數）、結構組合（樑柱系統、屋面系統、牆面系統）、構材（斷面、尺寸及材質）、被覆材料（散光性質、光透過率、透過光質、反射率、導熱性質、吸收率）、附屬設備（換氣、保溫、冷卻及加溫設備、反射板、灌溉系統、遮陰網等）

Ⅲ．作物群落：

植物結構（植物分佈、種植方位、葉面積指數）

輻射特性（吸收率、放射率）

植物特性（生理特性、光合成、氣孔開閉、葉溫、蒸散量、呼吸量）

Ⅳ．其他：

作業門之啟閉（出入次數、大小）、溫室密合度、作業人員（熱收支、呼吸量）、土壤（種類、水份含量、熱貯存及放射）、溫室周圍之地物。

由於以上諸因子之影響導致溫室內溫、濕度、日照、風速、CO_2環境之綜合變化。

各種園藝作物均有其特定生長之適宜環境，而設施為修正其不利條件以達到改善農作物品質、疏散產期、提高作物價值之初始目的，本研究即針對溫室內溫濕度環境之控制模式，模擬作物最適生長之溫濕度環境，並為將來溫室自動化控制奠定數理基礎。

二、研究目的

設施園藝的發展，在營運上有兩極端之傾向，一是以投入大量之資本，建立較大規模之設施、完備之裝置及高水準栽培管理技術之環境控制溫室園藝。另一為以最低需要的投資金額及勞力，構築簡易、無加溫冷卻設施以自然修正環境之設施園藝[1]；兩者基本上有其共同之技術及思想，然前者須投入大量資本，惟有大戶農家或企業家有能力經營，故本研究是屬於後者而儘量利用自然力量改善農業生產及農民工作環境為宗旨，降低生產成本，並提高農產品質，以提高生產性。

本省近幾年來隨經濟繁榮的腳步，園藝用溫室，如雨後春筍般到處林立，但溫室的構造及附

屬設備，大都仿造歐美、日等溫帶國家，因本省位於海洋性亞熱帶氣候區而與歐美、日之氣候差異大，尤其在夏季溫室內悶熱之微氣候工作者身心大受影響，且一般作物在此環境內生長沒有預期之順利，加上對溫室環境控制經驗方興未艾，幾乎都在黑暗中摸索，造成大量資金浪費[2]，故本研究之目的在建立一套通用型式之溫室內溫濕度氣候模擬及控制程式，供使用溫室者更有效地利用溫室，並使農業工程師或一般建造者在操作、設計、構造溫室時能依預知之情形，建造出最廉價且適合作物生長環境之溫室。

本模式之建立，摒除了利用儀器（日射計、風速計、溫濕度計、電熱偶、資料分析儀等感應器）計測的動態模擬依據，不但適用於預測工作，且可根據以往之氣象資料及植物生理資料，決定植物之最適生長季節，或作為新品種植物引進的價值評估，可供農民及農業試用機構選擇使用。另外尚可提供土溫變化情形，供研究土壤性質的學者使用，有利於農藝、農工、園藝方面做土壤結構之改善。

本程式均用自由格式化（Free Format），且儘可能使用中文說明，讓使用者能在最短時間內學會操作、輸入，並配合PC之普及，只要擁有PC即可使用本程式。

三、文獻探討

㈠相關研究及演進

溫室氣候在先進國家中已發展了幾十年，早期之研究主要以實驗及靜態分析為主，主要之研究群有英國Morris, Whittle, Lawrence（1954, 1959, 1960）所領導的NIAE研究組及德國Renard, Hiller（1956, 1957）為首之研究小組[3]。

60年代，隨著熱力學、熱傳遞學之發展，定常狀態（Steady state）之熱平衡方法被引用到溫室氣候分析，主要研究者有Yabuki, Imazu（1961）； Siebert, Renard（1962）Businger（1963）； Sugi, Takakura（1965），其中以Businger首創利用迭代法技巧由溫室環境因子預估溫室內溫度，此法不但為溫室氣候模擬立下一新里程碑，亦加速後來非定常狀態（Unsteady state）分析之腳步。

跟隨熱傳學之發展，分析溫室熱環境之非定常狀態也分成為數學解析法（Analytical methods）及數值方法（Numerical method）二種路線，在解析法方面有用線性加權法（Linearity-Weighting function method）（Takakura, 1967, 1968）[3]；被動網路法（Passive network method）（Froehich et al., 1979）；及用類比電腦解（1973，O′ Flaherty）。而在數值方法方面首推日人Takakura等（1971），用CSMP模擬語言做數值模擬，明確定出系統之邊界條件，如內表面凝結，溫室土層之二維分析等。此法隨電腦之進步而突飛猛進，相繼為人引用，有Kimball（1973，1981）；Soribe, Curry（1973）；Kindelan（1980）；Chandra et al.（1981）；Avissar, Mahrer（1982）；Von Elsner（1982）；…等人相繼提出類似之報告。至1983年G.P.A. Bot提出了一前所未有之複雜模式，主要包括3個子模式（光透過；熱及質量傳遞；控制函數）。

1983年ISHS（世界園藝協會），有感於模擬程式繁多，令人無所適從，故選取C.H.M. Van Bavel; T. Takakura; G.P.A. Bot三人之模式為代表，在美國Lubbock，日本Tokyo，荷蘭Wageningen，三地實測比較，於1985年報告指出，在相同條件下，其運算方法雖不盡相同，但其結果卻十分相近（在下節討論）。

㈡文獻的比較及探討

Takakura等人於1971年所提出預測溫室溫、濕度變化之電腦模擬程式中，加入了植物蒸發散量，濕床土的蒸發量，玻璃內表面之凝結量等之分析，連全天光照中之直射光及天空漫射光也分別測計其值；直射光相對於溫室之平均透過率則採用Threlkeld（1970）所提出的方法求出，在溫室外氣溫、比濕度、風速、直射光、漫射光之輸入方面則採用富利葉函數（Fourier series）。可貴的是在此程式中也計及到溫室之通風、加熱、蒸發冷卻等狀況之變動。在水氣之質量傳遞方面，也明確表示出在傳導面的組成及面與空氣間之比濕度差的大小對質量傳遞的多寡影響甚鉅，因此計測植物葉片之水汽傳遞量時可將氣孔的開閉情形視為時間函數代入；另在長波輻射熱交換方面則採用線性方式處理。綜合以上觀念及變因控制簡化後所做模擬結果顯示出：⑴長波輻射熱交換，⑵植物蒸發蒸散量，⑶濕床上蒸發量，三項所佔份量頗重，絕對不能忽視。

此程式是用迭代法及Runge-Kutta-Gill法計算，但不為一閉合解法，所以Froehlich等人（1979）採用Albright & Scott（1977）[3]提出對連棟多重覆蓋溫室之閉合式解法，以預測溫室內之比濕度、植物體及床面溫度。他們將牆、空氣、床面均視為能傳熱及貯熱之物質，並將溫室內加熱設備考慮在內；熱從牆面傳入床面之計算方式則用Jordan等人（1968）所提出之方法。在室外溫、濕度等資料輸入方面，則不用富利葉函數（Fourier Series）而改用尤拉函數（Euler formula），由於是閉合計算，故採用6個調和富利葉函數計算每小時輸入的資料值，然後跟實測值比較其結果顯示，用富利葉函數閉合計算，在每日開始及結尾均產生甚大誤差，須予去除，雖然如此，但其中間之計算值跟實測值出入不大。

㈢本研究之特色

在此次模擬中，我們摒除了富利葉函數及尤拉函數而採用多項式迴歸後之係數，其優點可因時因地不同，而以輸入的溫、濕度、風速、植物內層擴散阻力等係數，故只要有氣象局公佈之預測最高、最低溫度及相對濕度，則可依迴歸曲線輸入係數而得當時間之溫、濕度，其例如下：

$$Ti = Tmin + Ci\,(Tmax - Tmin)$$

再則我們亦把植物內層水汽擴散阻力係數，當成時間函數，隨時間之不同，改變其值，這是尚未有人嘗試過的，本次採用之係數曲線乃Cocilia Stanghellin等人（1985）之實驗數據迴歸曲線。

本模擬程式因顧及台灣及日本均屬海洋型氣候，且日本之溫室發展背景及路線與台灣相近，故選取Takakura之模式為主要架構，加入外氣候模擬代替儀器（Sensor）之動態模擬，且顧及植物之生長特性，並引用各國相關研究報告、文獻之成果修正模式，使更適合台灣溫室環境之模擬，並為將來設施園藝自動化控制系統奠定良好數理基礎。

四、溫室內傳熱原理及氣象條件

㈠熱傳原理

熱乃由高溫處流向低溫處[4]，此熱之移動現象可分為熱傳導（Heat conduction），熱對流（Heat convection），熱輻射（Heat radiation）三種，其中熱傳導係高溫處分子因振盪對低溫處分子連續不斷的傳遞熱之能量；熱對流係物體的熱之一部份對他部份之相對移動，同

時具有熱能量之搬運現象；熱輻射乃熱之能量按電磁波之形態而傳遞者。

1.熱傳基本式

熱由高溫處向低溫處移動時，在熱之流動處各部份之溫度不因時間之經過而變動，即溫度之分佈一定與時間之變動無關，此熱之傳遞狀態稱為穩定狀態（Steady State）[5]，以下各式均在穩定狀態下之熱傳遞式。

⑴熱傳導之基本式

有一均質材料厚度d，高溫面之溫度 θ_1（℃），低溫面之溫度 θ_2（℃），熱由一面流向他面，若處穩定狀態下則熱之流量與溫度差（$\theta_1 - \theta_2$）、時間t（hr）及壁面積F（㎡）成比例，與厚度（距離）d成反比，故通過壁面之熱量即所傳導之熱量Q（Kcal）可依下式[6][7]表之：

$$Q = k\,(\theta_1 - \theta_2)\,Ft/d$$

k：熱傳導係數（Thermal conductivity）（Kcal/ m.hr.℃）

⑵熱對流之基本式

熱傳遞中由固體表面與周圍流體間之傳熱現象稱為對流傳熱，此傳遞量適用於牛頓冷卻定律（Newton' s cooling law），即微小時間dt，所通過微小面積dF之熱量dQ如下式[6][7]：

$$dQ = h\,(\theta_1 - \theta_2)\,dFdt$$

在穩定狀態時，t 時間所流熱量Q為

$$Q = h\,(\theta_1 - \theta_2)\,Ft$$

θ_1：固體之溫度　（℃）

θ_2：周圍流體之溫度　（℃）

h　：熱對流係數　（Kcal/ ㎡・hr・℃）

⑶熱輻射之基本式

輻射乃空間中某點之能量對他點以相當大之速度而移動之現象，物質的分子振動激烈時放射出一種電磁波稱為輻射波，由此輻射波來傳遞熱之能量，此量與輻射體及受射體之射出率有關，且與輻射體對受射體之形態係數成正比，並與溫度之4次方差成正比，其表示式如下[6][7]：

$$Q = \varepsilon_1\ \varepsilon_2\ \eta_{12}\ \sigma\,(\theta_1^4 - \theta_2^4)$$

Q　：單位面積、時間之熱量（Kcal／㎡ hr）

ε_1：輻射體之射出率

ε_2：受射體之射出率

η_{12}：輻射體對受射體之形態係數

σ　：波茲曼常數（Stefan-Boltzmann Coeff.）

約4.88 E-8 Kcal／㎡ hr ° K⁴

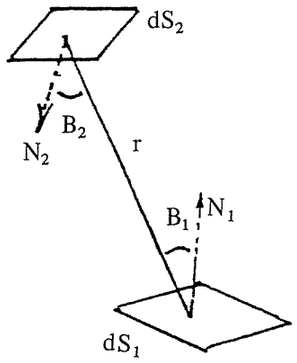
＊＊有關形態係數詳論於四㈡節。

㈡形態係數（Shape Factor）

形態係數是兩個面之間居於幾何位置關係，由一個面放射光能到達第二面個的能量之比率[8]。而不代表到達第二面為它所“吸收”之大小，而且它代表由第一個面“直接”放射到達

第二面，中間不經過任何物體間接反射。形態係數祇依兩面之幾何位置而定，與大小無關[9]，如下圖；根據Lambert餘弦定理，空間中兩微小面dS_1，dS_2間之形態係數可以下式[6]表之：

$$\Phi_{12}=\frac{COS\ B_1\ COS\ B_2\ dS_2}{\pi\ r^2} \qquad (1)$$



故若兩平面面積S_1，S_2則由S_1放射輻射量進入S_2其形態係數Φ_{12}為：

$$\Phi_{12}=\frac{1}{S_2}\int_{S_1}\int_{S_2}\frac{COSB_1COSB_2}{\pi r^2}\ dS2dS_1$$

1.形態係數之交互法則

交互法則又名互換定理[9]，由上式知

$$\Phi_{12}\ S_2=\int_{S_1}\int_{S_2}\frac{COSB_1COSB_2}{\pi r^2}\ dS_2dS_1$$

$$=\Phi_{21}\ S_1$$

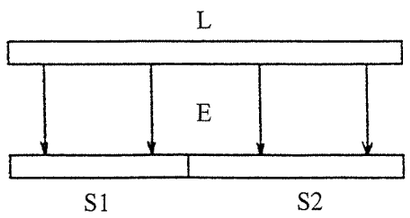
$$\Phi_{21}=\frac{S_2}{S_1}\ \Phi_{12}$$

此關係即為交互法則，它永遠成立，係由純幾何學之關係，與溫度無關。

2.形態係數之特質

(1)受輻體之切割

如下圖所示，有一平面L發射一單位面積、單位時間之均質光源E，投射於面積S之平面，若受射體之形態係數為$\Phi_{L\text{-}S}$，則$\Phi_{L\text{-}S}$與$\Phi_{L\text{-}S1}$及$\Phi_{L\text{-}S2}$有如下之關係：



S=S1+S2

依能量不滅原理得

$$E\ \Phi_{L\text{-}S}\ S=E\ \Phi_{L\text{-}S1}S_1+E\ \Phi_{L\text{-}S2}S_2$$

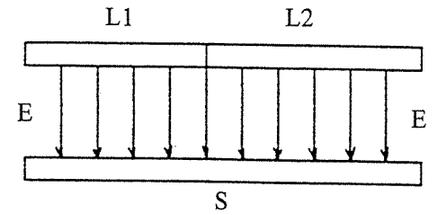
$$\Rightarrow\ \Phi_{L\text{-}S}=(\Phi_{L\text{-}S1}S_1-\Phi_{L\text{-}S2}S_2)/S$$

$$=\Phi_{L\text{-}S1}S_1/S+\Phi_{L\text{-}S2}S_2/S$$

亦即平面之形態係數為其分割平面之形態係數的面積加權平均；若分割採等面積分割則平面之形態係數乃其分割平面之形態係數的平均值[9]。

(2)輻射體之切割

如下圖所示，若將光源面L切割為L_1及L_2兩面均以強度為E之光源投射於平面S，則形態係數$\Phi_{L\text{-}S}$與$\Phi_{L1\text{-}S}$及$\Phi_{L2\text{-}S}$有如下之關係：



L=L1+L2

亦從能量不滅之關係可得

$$E\ S\ \Phi_{L\text{-}S}=E\ S\ \Phi_{L1\text{-}S}+E\ S\ \Phi_{L2\text{-}S}$$

$$\Rightarrow\ \Phi_{L\text{-}S}=\Phi_{L1\text{-}S}+\Phi_{L2\text{-}S}$$

$$\Rightarrow\ \Phi_{L1\text{-}S}=\Phi_{L1\text{-}S}-\Phi_{L2\text{-}S}$$

$$\Rightarrow\ \Phi_{L2\text{-}S}=\Phi_{L1\text{-}S}-\Phi_{L2\text{-}S}$$

由上可知若有多個光源面均以等值之均質光源投射於同一平面，則其形態係數可適用於加減之運算[9]。

㈢氣象條件

1.氣溫變化之模擬

根據ASHRAE統計歷年來每日氣溫變化之資料顯示每日氣溫之變化可以一條標準曲線表示之[9]，由此僅需知每日之最低及最高溫度，即可推算一日中任意時刻之氣溫變化，此標準曲線如下圖，一日中任一時刻氣溫之計算公式如下：

$$Ti=Tmin+Ci\ (Tmax-Tmin)$$

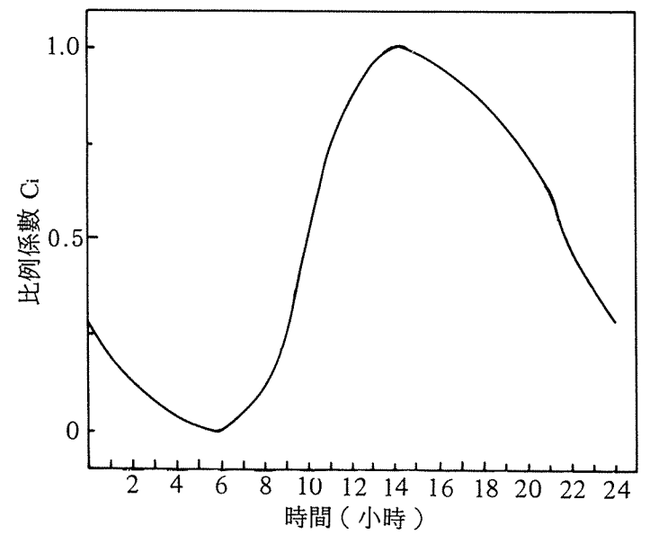


圖1.1 氣溫變化標準曲線圖

故由氣象局預測之最高溫度Tmax及最低溫度Tmin，再由上圖中查出該時刻之Ci值，即可計算出該時刻之氣溫，此舉是為了替代使用感測器而完成更有效率之預測工作。

2.濕度變化之模擬

一般情況下，氣溫上升後，若空氣中所含水量未變，則因飽和蒸氣壓增高，故相對濕度下降，由是假設一日中的空氣為同一空氣，則濕度的全日變化恰與氣溫變化成反比。同理僅須知每日之最大及最小相對濕度即可推算出一日中任一時刻之濕度變化，其標準曲線如下圖所示[10]，同理一日中任一時刻之Di值可由上圖查出，再由氣象資料得知最高相對濕度R Hmax及最低相對濕度R Hmin化入公式，即可求出任一時刻之相對濕度：

$$R\ Hi = R\ Hmin + (R\ Hmax - R\ Hmin)\ Di$$

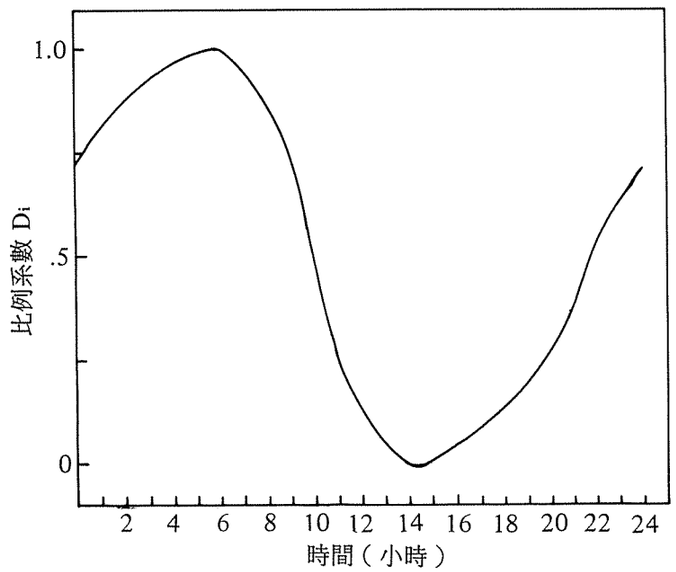


圖1.2　濕度變化標準曲線圖

3.大氣透過率

在溫室計算中陽光之透過、吸收、反射等均非常複雜，有關計算過程及方法無法一一贅述，但在此特別要提出討論的是「大氣透過率」的值。一般在計算大氣透過率均採下列公式計算[11]：

$$\tau_m = 0.5\,(e^{-0.65m} - e^{-0.095m})$$

上式中　$m\ (Z, \alpha) = m\ (O, \alpha)\ P(Z) / P(\theta)$

其中　$m\ (O, \alpha) = [1229 + (614\ SIN\alpha)^2]^{1/2} - 614\ SIN\alpha$

τ_m：大氣透過率

Z：海拔高度

α：太陽高度

P：大氣壓

但我們代入其公式運算，發現其值遠大於氣象局近幾年來公佈之實值，查其原因乃上列公式只適合於無空氣污染的晴朗天氣，較不適用於台灣氣象，故採用Hottel（1962）所提出之修正公式[12]如下：

$$\tau_m = a_0 + a_1\ e^{-KCSC\alpha}$$

a_0，a_1，k，稱為大氣模數，如下表，海拔不同時可用內插或外插方法求得，其值比較接近台灣現有之大氣透過率的值。

表四・一　大氣模數值

	海平面上高度（KM）					
	0	0.5	1	1.5	2	2.5
	23 Km 模糊模型					
a_0	0.1283	0.1742	0.2195	0.2582	0.2915	0.320
a_1	0.7559	0.7214	0.6848	0.6532	0.6265	0.602
K	0.3878	0.3436	0.3139	0.2910	0.2745	0.268
	5 Km 模糊模型					
a_0	0.0270	0.063	0.0964	0.126	0.153	0.177
a_1	0.8101	0.804	0.7978	0.793	0.788	0.784
K	0.7552	0.573	0.4313	0.330	0.269	0.249

4.太陽位置

由太陽所射出之輻射線，即為日光，其對地上之物體照射現象稱為日照，日照中包括日射，通常所指日射乃太陽輻射線之熱作用而言，溫室中之微氣象環境能量來源大部份來自日照，故要探討溫室環境，首先須了解太陽在該區之位置（高度角、方位角），一般太陽高度h及太陽方位角A計算方式[6][12]如下：

$$Sin\ h = Sin\ \Psi\ Sin\ \delta + Cos\ \Psi\ Cos\ \delta Cos\ t$$

$$Cos\ A = \frac{Sin\ h\ Sin\ \Psi - Sin\ \delta}{Cos\ h\ Cos\ \Psi}$$

或

$$Sin\ A = \frac{Sin\ t\ Cos\ \delta}{Cos\ h}$$

其中

Ψ：表緯度，北半球$\Psi > 0$，南半球$\Psi < 0$

δ：表太陽赤緯，春分、秋分$\delta = 0°$，夏至$\delta = 23°\ 27'$，冬至$\delta = -23°\ 27'$

因太陽赤緯每年週期性變動其計算方式方：

$$Sin\ \delta = Sin\ 23°\ 27'\ Sin\ B$$
$$= 0.394979\ Sin\ B$$

B＝360（n-81）／365〔°〕[11]

t：表時角，真太陽時之正午為0°，午前為負，午後為正，一小時15°之分割，其換算式如下：

t＝（ta－12）＊15

＝｛ts＋（E＋（L－Ls）／15－12）｝＊15

ta：真太陽時

ts：標準時

L：經度（東經為正，西經為負）

Ls：標準子午線經度（東經為正，西經為負）

E：均時差，其近似公式如下：

E＝（9.87 Sin 2B-7.53 CosB-1.5 SinB）／60

＝0.1645 Sin 2B－0.1255 CosB－0.025 SinB[11]

有關太陽位置（高度角，方位角）之原理及計算公式之推演，不在此贅述，若有興趣可參閱參考文獻中之書籍。

五、模式之建立

溫室內溫、濕度平衡建立的基準點，主要依據熱收支平衡及水收支平衡之原理。

㈠熱收支及水收支式

1.熱收支式

｛溫室內空氣獲得之熱量｝

＝｛被覆材料內表面之對流傳熱量｝＋｛換氣產生內外空氣對換之顯熱傳達量｝＋｛作物體表面之顯熱傳達量｝＋｛加熱器之熱傳達量｝－｛冷卻器之熱傳達量｝

2.水收支式

｛溫室內空氣獲得之水汽量｝

＝｛內外空氣交換之水蒸氣流入量｝＋｛土壤表面之蒸發量｝＋｛作物葉面之蒸發蒸散量｝－｛被覆材料內表面之凝結量｝

基於此基本原理，我們發展了整個溫室內溫、濕度平衡之理論，其詳論於五㈡節。

㈡溫室內溫濕度平衡理論

1.被覆材料之熱平衡[13][14]

被覆材料之熱平衡可分為三部份，即材料外表面、材料內層及材料內表面來討論之，請參閱附圖㈠。

Ⅰ.被覆材料外表面

⑴被覆材料外表面與空氣之對流熱交換

Q_{og_1}＝h ou（t）〔θ ou（t）－θ og（t）〕

hou（t）：材料外表面之對流係數〔Kcal／m² hr ℃〕

θ ou（t）：外氣溫

θ og（t）：被覆材料外表面溫度

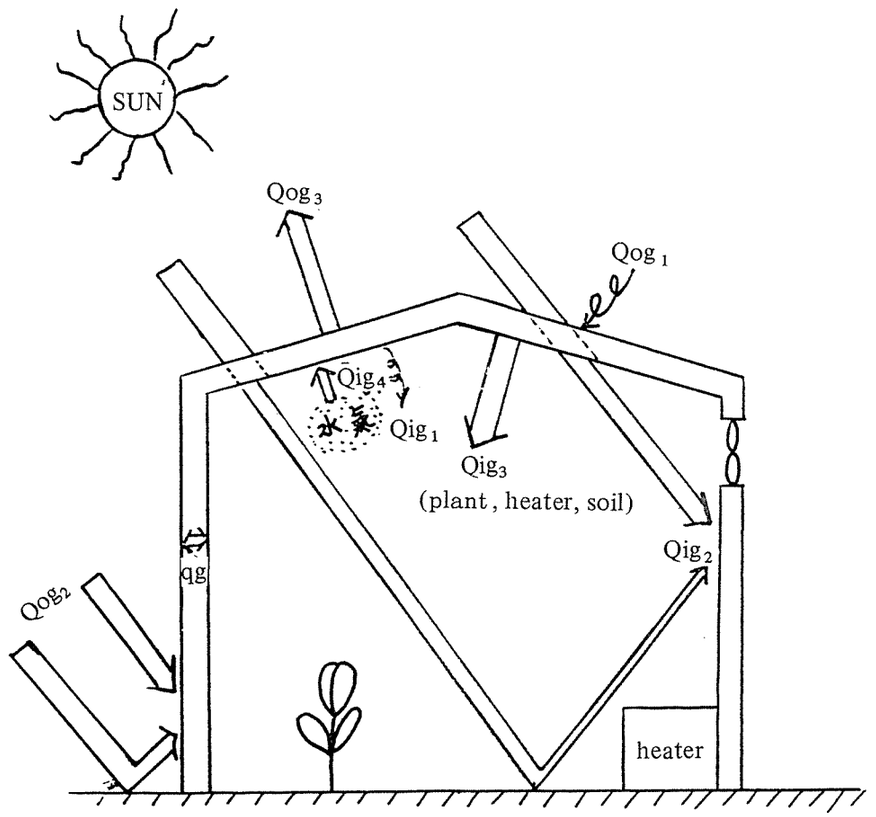


圖1 被覆材料之熱平衡圖

Ⅰ.被覆材料外表面

Ⅱ.被覆材料內層

Ⅲ.被覆材料內表面

⑵短波輻射熱交換

Q_{og_2}＝αg〔λ（t）（1＋ηss r os）Rdd（t）＋Rss（t）〕fs（t）

αg：被覆材料之吸收率

λ（t）：材料外表面直接日照之比率

ηss：土壤對被覆材料之形態係數

r os：土壤之反射率

Rdd（t）：直接日射量

Rss（t）：漫射量

fs（t）：遮蔽係數

⑶長波輻射熱交換

Q_{og_3}＝ηg Rlg（t）

ηg：被覆材料對天空之形態係數

Rlg（t）：被覆材料外表面之長波淨輻射量

由(1)、(2)、(3)得材料外表面所獲得熱量為

$Qgo = Qog_1 + Qog_2 - Qog_3$

Ⅱ.被覆材料之熱傳導[13][14]

$$Qg = \frac{Kg}{Lg}[\ \theta og(t) - \theta ig(t)\ ]$$

Kg：被覆材料之熱傳導係數〔Kcal／m hr ℃〕

Lg：被覆材料之厚度〔m〕

Ⅲ.被覆材料內表面[13][14]

(1)被覆材料內表面與空氣之對流熱交換

$Q ig_1 = h in(t)[\ \theta ig(t) - \theta in(t)\ ]$

h in(t)：被覆材料內表面之對流係數〔Kcal／m^2 hr ℃〕

(2)材料內表面與直達日射反射之吸收量

$Q ig_2 = \alpha g[\ \tau d(t)\ (\ \delta(t) + \eta is\ r\ isp)\ ]Rdd(t)\ fs(t)$

τ d(t)：平均被覆材料透過率（受日照面）

δ(t)：被覆材料內表面直接日照之比率

η is：內部土壤對被覆材料內表面之形態係數

r isp：溫室內地表之反射率

(3)被覆材料內表面對植物、土壤等之輻射熱交換

$Q ig_3 = \Sigma\ \varepsilon g\ \ \varepsilon j\ \ \eta gj\ \ \sigma\ Cgj[\ \theta ig(t) - \theta j(t)\ ]$

j：表植物、土壤、加熱器…等

ε g：被覆材料之射出率

ε j：j 物體之射出率

η gj：被覆材料對 j 物體之形態係數

σ：波茲曼常數，約4.88E-8〔Kcal／m^2 hr k^4〕

Cgj：被覆材料對 j 物體之溫度積〔° K^3〕

$Cgj = (\ \theta g + \theta j)(\ \theta g^2 + \theta j^2)$

(4)被覆材料內表面與水蒸氣之熱交換

$Q ig_4 = \mu\ Km\ \ \zeta ig[\ Win(t) - Ws(\ \theta ig)\ ]$

μ：水蒸氣蒸發或凝結之潛熱容量〔Kcal／Kg〕

Km：水蒸氣質量傳導係數〔Kg／m^2 hr〕

ζig：凝結實驗常數（此以被覆材料為標準定為1）

W in(t)：室內空氣之比顯度

W s(θig)：飽和比濕度

綜合(1) (2) (3) (4)得材料內表面之熱量為

$Q gi = Q ig_1 - Q ig_2 + Q ig_3 - Q ig_4$

現根據Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、所得被覆材料外表面所得熱量Q go，被覆材料熱傳導Q g及材料內表面之熱

量Q gi，若假設材質為定常狀態（Steady State）則

$Q go = Q g = Q gi$

依上式可推導出

$$\theta ig = \frac{NUMER}{DENOM}$$

式中

$$DENOM = h in + \varepsilon g\ \sigma(\ \varepsilon p\ \eta gp\ Cgp + \varepsilon s\ \eta gs\ Cgs + \varepsilon h\ \eta gh\ Cgh) - \{(Kg/Lg)^2/(Kg/Lg + h ou + \varepsilon g\ \sigma\ \eta g\ Cgo)\} + Kg/Lg$$

$$NUMER = \frac{(Kg/Lg)\{h ou + \varepsilon g\ \sigma\ \eta g\ Cgo\ fs\}}{Kg/Lg + h ou + \varepsilon g\ \sigma\ \eta g\ Cgo}\ \theta ou$$

$$+ \varepsilon g\ \varepsilon p\ \sigma\ \eta gp\ Cgp\ \theta p + \varepsilon g\ \varepsilon s\ \sigma\ \eta gs\ Cgs\ \theta s$$

$$+ \varepsilon g\ \varepsilon h\ \sigma\ \eta gh\ Cgh\ \theta h + \mu\ Km\ \xi ig[\ Win - Ws(\ \theta Ig)\ ]$$

$$+ h in\ \theta in + \alpha g\ Z_d\ (\ \delta + \eta is\ risp)\ Rdd\ fs$$

$$+ \frac{(Kg/Lg)\ \alpha g\ \lambda\ (1 + \eta ss\ ros)Rdd + Rss\ fs}{(Kg/Lg) + h ou + \varepsilon g\ \sigma\ \eta g\ Cgo}$$

$$- \frac{(Kg/Lg)\ \varepsilon g\ \sigma\ \eta g\ Cgo\ *\ 273\ *(1 - fs)}{(Kg/Lg) + h ou + \varepsilon g\ \sigma\ \eta g\ Cgo}$$

2.室內空氣能量平衡[13][14]

室內空氣能量平衡可參照圖2所示分為五部份來討論：

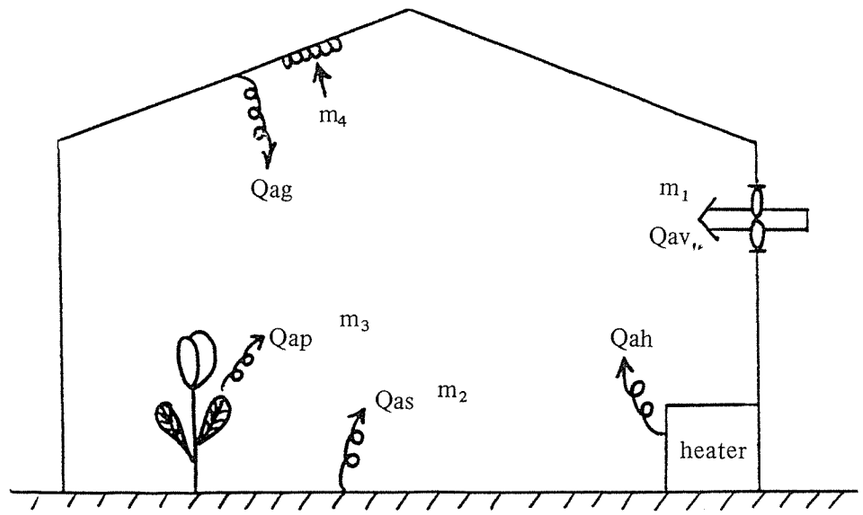


圖2　室內空氣能量平衡及濕度（水蒸汽質量傳遞）平衡圖

Ⅰ.空氣與被覆材料之熱對流交換

$Q_{ag}=h_{in}(t)\ (\theta_{ig}(t)-\theta_{in}(t))A_g$

A_g：被覆材料表面積〔㎡〕

Ⅱ.室內外通風之對流熱交換

$Q_{av}=h_{ven}(t)\ [\theta_{ou}(t)-\theta_{in}(t)]A_g$

$h_{ven}(t)$：通風之對流係數〔Kcal／㎡ hr ℃〕

Ⅲ.空氣與土壤之對流熱交換

$Q_{as}=h_{is}(t)[\theta_{is}(t)-\theta_{in}(t)]A_s$

$h_{is}(t)$：空內土壤之對流係數〔Kcal／㎡ hr ℃〕

A_s：土壤之表面積

Ⅳ.空氣與加熱器之對流熱交換

$Q_{ah}=h_{ih}(t)[\theta_h(t)-\theta_{in}(t)]A_h$

$h_{ih}(t)$：加熱器之對流係數〔Kcal／㎡ hr ℃〕

A_h：加熱器之表面積

Ⅴ.空氣與植物之對流熱交換

$Q_{ap}=h_{ip}(t)[\theta_p(t)-\theta_{in}(t)]2A_p$

A_p：葉子表面積

由Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ可知室內空氣能量變化為

$$C_aV_g\frac{d\theta_{in}(t)}{dt}=Q_{ag}+Q_{av}+Q_{as}+Q_{ah}+Q_{av}$$

C_a：空氣之定壓比熱〔Kcal／㎥ °K〕

V_g：溫室內空氣體積〔㎥〕

3.室內空氣濕度平衡[13][14]

室內空氣濕度平衡可參照圖2所示，亦分為四部份來討論：

Ⅰ.通風之水蒸氣質量傳遞

$M_1=\rho\ h'_{ven}(t)\ [W_{ou}(t)-W_{in}(t)]A_g$

ρ：表空氣密度〔kg／㎥〕

$h'_{ven}(t)$；表單位被覆材料面積之通風量〔m／hr

Ⅱ.土壤與空氣之水蒸氣質量傳遞

$M_2=K_m\ \zeta_{is}[W_s(\theta_{is})-W_{in}(t)]A_s$

ζ_{is}：表內部土壤水蒸發實驗常數

Ⅲ.葉子與空氣之水蒸氣質量傳遞

$$M_3=\frac{\rho}{r_l(t)+r_a}[W_s(\theta_p)-W_{in}(t)]2A_p$$

$r_l(t)$：葉內層水蒸氣擴散阻力係數〔hr／m〕

r_a；葉表面蒸發阻力係數〔hr／m〕

Ⅳ.被覆材料與空氣之水蒸氣質量傳遞

$M_4=K_m\ \zeta_{ig}[W_{in}(t)-W_s(\theta_{ig})]A_g$

故由Ⅰ～Ⅳ可知室內空氣中水蒸氣質量變化為

$$\rho\ V_g=\frac{dW_{in}(t)}{dt}M_1+M_2+M_3-M_4$$

4.植物葉表面之能量平衡[13][14]

植物葉表面之能量平衡可參照圖3所示，分為四部份來討論：

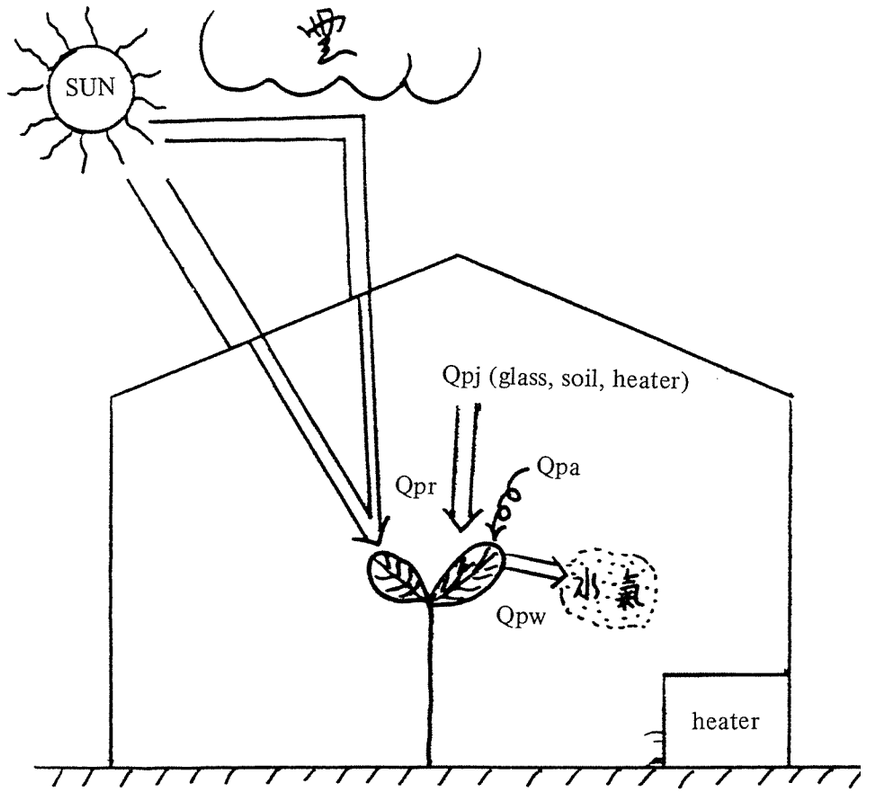


圖3　植物葉表面之能量平衡圖

Ⅰ、葉表面與空氣之熱流交換

$Q_{pa}=h_{ip}(t)[\theta_{in}(t)-\theta_p(t)]2A_p$

Ⅱ、葉面所吸收之輻射量

$Q_{pr}=\alpha_p[\tau_g(t)R_{sd}(t)+\tau_s R_{ss}(t)]f_s(t)\ A_p$

α_p：植物之吸收率

$\tau_g(t)$：平均被覆材料有效透過率

τ_s：平均被覆材料透過率

$R_{sd}(t)$：水平面直達日射量

Ⅲ、植物對被覆材料、土壤、加熱器等之輻射熱交換

$$Q_{pj}=\Sigma\ \varepsilon_p\ \varepsilon_j\ \eta_{pj}\ \sigma\ C_{pj}\{\theta_j(t)-\theta_p(t)\}A_p$$

j　　：表被覆材料、加熱器、土壤…等

Ⅳ、植物對空氣之潛熱傳遞

$$Q_{pw}=\frac{\rho\quad\mu}{r_1(t)+r_a}\{W_s(\theta_p)-W_{in}(t)\}2A_p$$

μ　　：水蒸氣之潛熱容量〔Kcal／kg〕

由Ⅰ～Ⅳ可知植物葉表面之能量變化為

$$C_{pl}\ V_p\frac{d\theta_p(t)}{dt}=Q_{pa}+Q_{pr}+Q_{pj}-Q_{pw}$$

5.土壤之熱傳導能量平衡[13][14][15]

假設：

Ⅰ、二維之模擬，不考慮縱向（溫室深度）之熱傳

Ⅱ、地表層（$\triangle Y_1$之層）為等溫層，但室內外土溫可不等

Ⅲ、$\triangle Y_5$之下層（即斜線層）為恆溫層

Ⅳ、土溫以Y軸為中心左右對稱分佈

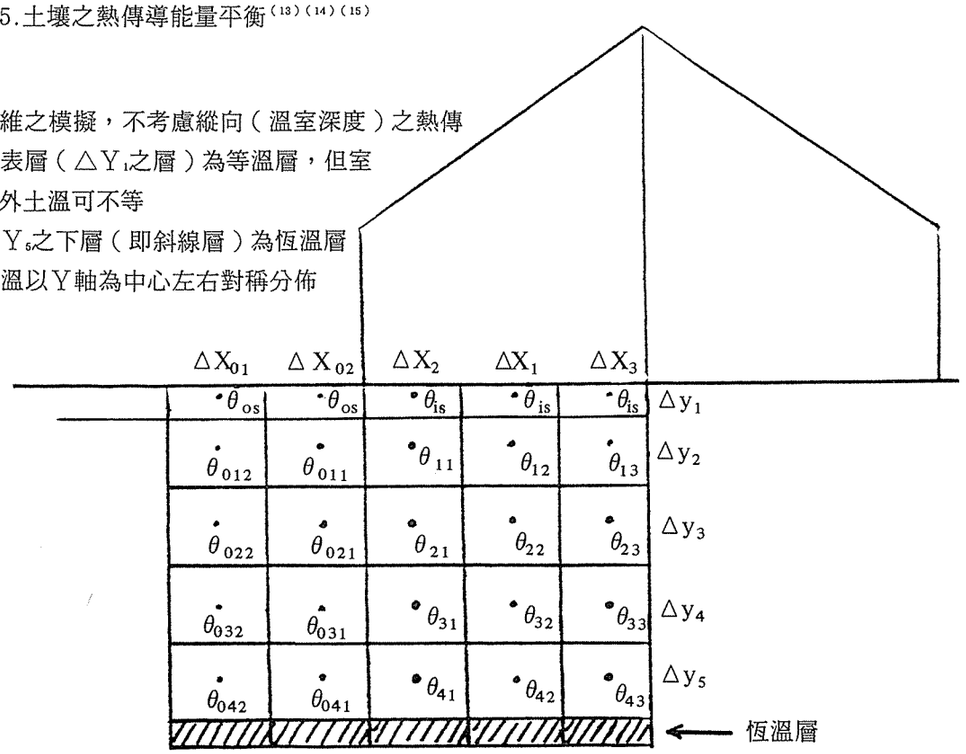


圖4　土壤之能量平衡圖

地表附近之氣溫係受地溫之影響，而地溫係因太陽之輻射熱所產生者，地溫亦為氣象要素之一。地溫依其自地表下之深度而異，惟祇達某一深度後幾乎無任何變化，然此深度依場所或土質而異。由於土壤之溫度為溫室氣象要素之一，故需加以考慮，然土壤之熱傳導牽涉到土壤之結構、組成、傳導方向、吸收率、輻射率…等物理性質，相當複雜，至今仍為土壤學研究者努力之方向，所幸土壤之熱傳與日照輻射之熱量比較起來所佔份量不大，故可簡化模式來模擬之，如圖4將土壤以適當之大小切割分區討論，並有下列幾項假設：

①此模式為二維之熱傳導模式，不考慮縱向（溫室深度方向）之熱傳。

②地表層為等溫層（即圖中$\triangle Y_1$之層），但溫室內與溫室外之地表溫度可不同。

③土壤溫度以Y軸為中心，左右對稱分佈。

④$\triangle Y_6$之下層為恆溫層，終年溫度不變。

有了以上之假設我們即可分區的列出其熱傳方程式，由於區域太多，無法一一列舉，僅列出幾個做為代表，其餘區塊依此類推。

Ⅰ、$\triangle X_5\triangle Y_1$區域之熱傳方程式

$$C_s\triangle X_5\triangle Y_1\ \frac{d\theta_{is}(t)}{dt}=$$

$$\{\frac{K_s}{(\triangle Y_1+\triangle Y_2)/2}\{\theta_{24}+\theta_{25}+\theta_{26}-3\theta_{is}\}\triangle X_5/3\}$$

$$+\{\Sigma\ \varepsilon_s\varepsilon_j\ \eta_{sj}\ \sigma\ C_{sj}\{\theta_j(t)-\theta_{is}(t)\}\triangle X_5\}$$

$$+\{h_{is}(t)\{\theta_{in}(t)-\theta_{is}(t)\}\triangle X_5\}$$

$$+\{\alpha_s[\tau_g(t)\ R_{sd}(t)+\tau_s\ R_{ss}(t)]f_s(t)\ \triangle X_5\}$$

$$-\{\mu\ K_m\ \xi_{is}\{W_s(\theta_{is})-W_{in}(t)\}\triangle X_5\}$$

C_s：土壤之比熱　　〔Kcal／m^3°K〕

K_s：土壤之熱傳導係數　　〔Kcal／m hr°K〕

Ⅱ、$\triangle X_5\triangle Y_3$區域之熱傳方程式

$$C_s\triangle X_5\triangle Y_3\ \frac{d\theta_{35}(t)}{dt}=$$

$$\{\frac{K_s}{(\triangle Y_2+\triangle Y_3)/2}\{\theta_{25}(t)-\theta_{35}(t)\}\triangle X_5\}$$

$$+\{\frac{K_s}{(\triangle Y_3+\triangle Y_4)/2}\{\theta_{45}(t)-\theta_{35}(t)\}\triangle X_5\}$$

$$+\{\frac{K_s}{(\triangle Y_4+\triangle Y_5)/2}\{\theta_{34}(t)-\theta_{35}(t)\}\triangle X_3\}$$

$$+\{\frac{K_s}{(\triangle Y_5+\triangle Y_6)/2}\{\theta_{36}(t)-\theta_{35}(t)\}\triangle X_3\}$$

Ⅲ、$\triangle X_2\triangle Y_1$區域之熱傳方程式

$$C_s\ \triangle X_2\ \triangle Y_1\ \frac{d\theta_{os}(t)}{dt}=$$

$$+\{\frac{K_s}{(\triangle Y_1+\triangle Y_2)/2}\{\theta_{22}(t)-\theta_{23}(t)-2\theta_{os}(t)\}\triangle X_2/2\}$$

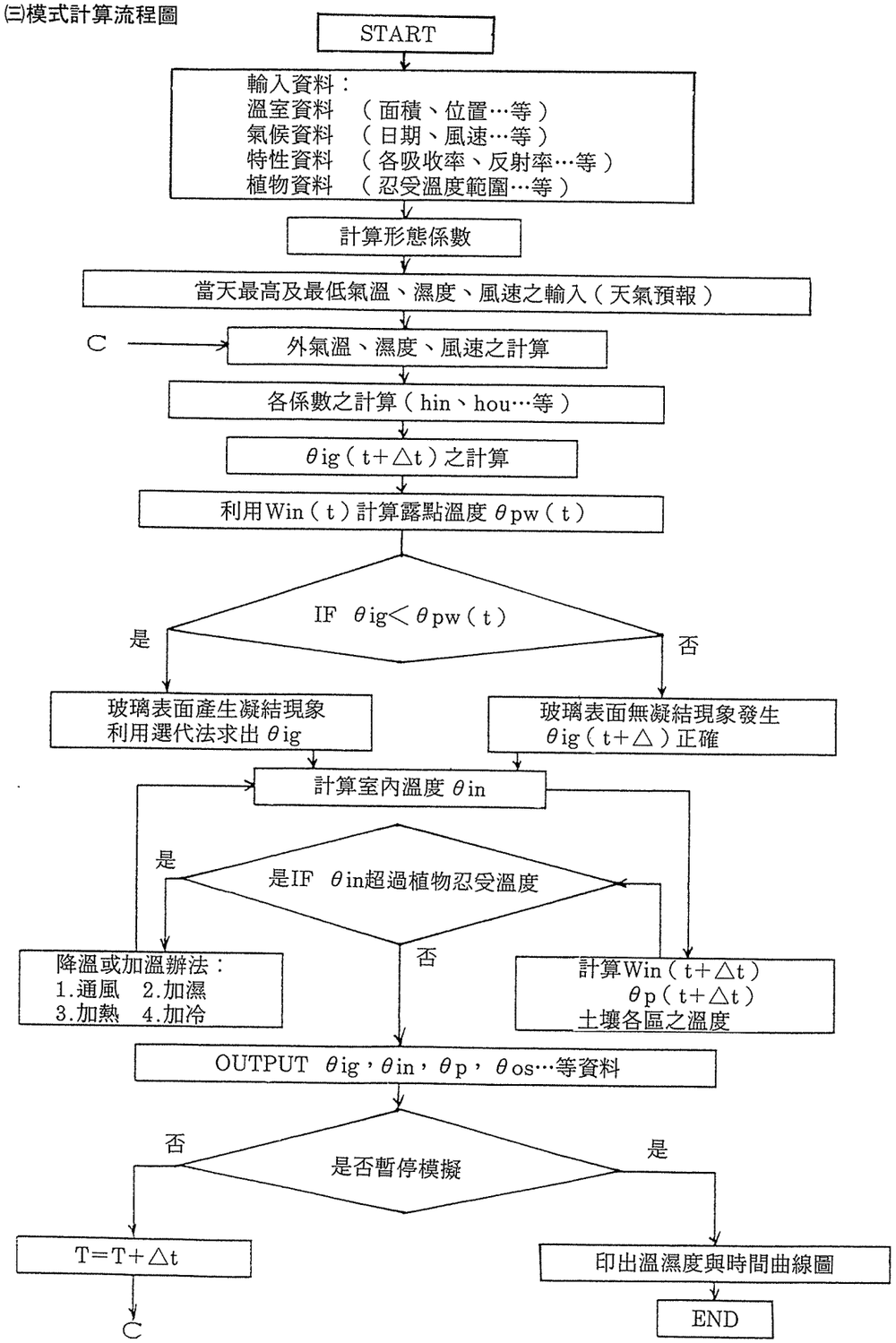
$$-\{\eta_s\ R_{ls}(t)\ \triangle X_2\}+\{\alpha_s\{R_{sd}(t)+R_{ss}(t)\}\}\triangle X_2\}$$

$$+\{h_{os}(t)\{\theta_{ou}(t)-\theta_{os}(t)\}\triangle X_2\}$$

$$-\{\mu\ K_m\ \xi_{os}\{W_s(\theta_{os})-W_{ou}(t)\}\triangle X_2\}$$

以此方式考慮區域之熱傳方程式，共可列出二十多個相關方程式，若區塊分割越細則方程組更多，但所幸交由電腦處理，不致太過麻煩。

㈢模式計算流程圖

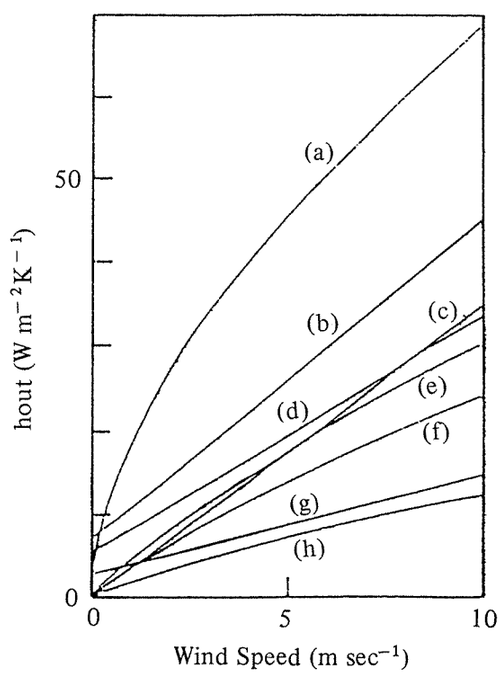


㈣係數之探討

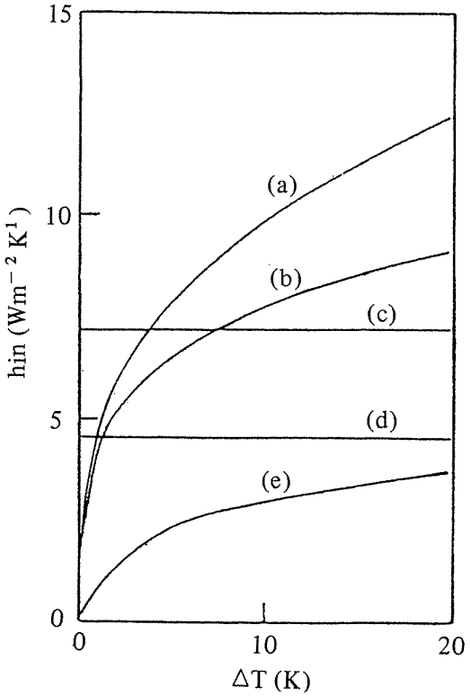
本節所討論之係數係指材料之特性係數，例如被覆材料之反射率、吸收率、透過率或植物的蒸發阻力係數、對流係數等，均有前人研究之文獻可尋，其係數雖因材質不同而異，但同一材質則變化不大，故可引用，分述如下：

1.對流係數

從ACTA Horticultural 174, 1985，“Greemhouse Climate and its Control”，p. 104[8]中可查得被覆材料外表面之對流係數 h ou（t）〔K cal／m^2 hr ℃〕及被覆材料內表面之對流係數 h in（t）〔Kcal／m^2 hr ℃〕



a) 18 $V^{0.576}$
b) 7.2 + 3.8 V
c) 3.5 V
d) 5.6 + 2.8 V
e) 6 $V^{0.8}$
f) 3.85 $V^{0.8}$
g) 2.8 + 1.2V
h) 1.98 $V^{0.8}$



a) 4.6 $\Delta T^{1/3}$
b) 4.36 $\Delta T^{0.25}$
c) 7.2
d) 4.6
e) 1.38 $\Delta T^{1/3}$

由圖中可發現內外表面之對流係數經驗公式相當多，且差異很大，但有一點可確認，即外表面之對流係與風速有較直接之關係，而內表面由於溫室內風速較不明顯，其對流大部份靠溫度差來排除，故其公式大多與△T成正比。

2.吸收率

⑴被覆材料之吸收率 αg，由於溫室之被覆材料隨著用途及科技而變，種類相當多，故現以玻璃為例，可從“太陽能之應用及理論”[7]中p.126普通玻璃大約6.8～11.0%左右，若

中等玻璃約4.9～7.0%左右。

⑵植物吸收率 αp，從“Environmental Control for Agricultural Buildings”[12]中p 153查得 αg約0.68～0.97，依種類而定。

⑶土壤吸收率 αs，從“Environmental Control for Agricultural Buildings”[12]中p 153查得 αs約0.55～0.93，依種類而定。

3.射出率

被覆材料之射出率 εg，植物之射出率 εp及土壤之射出率 εs亦可兩儀“Environmental Control for Agricultural Buildings”[12]中 p 153查得，以玻璃為例：

εg 約0.90～0.95

εp 約0.90～0.98

εs 約0.44～0.98

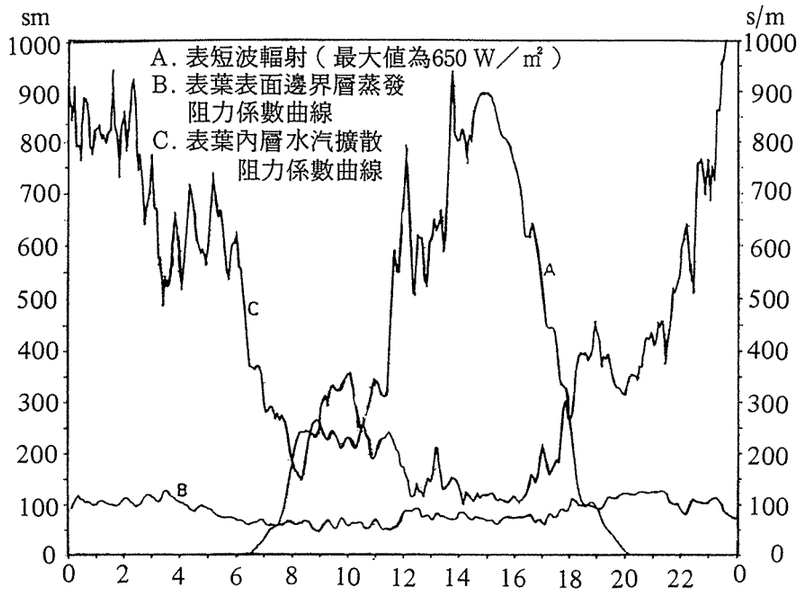
4.反射率

土壤之反射r os及土壤和植物之反射率r isp，從“太陽能之應用及理論” p 55[5]中可查得

沙 漠	0.24～0.28	乾裸地	0.1 ～0.2
濕裸地	0.08～0.09	乾草地	0.15～0.25
濕草地	0.14～0.26	乾 砂	0.18
濕 砂	0.09		

5.蒸發及擴散阻力係數

葉表面邊界層蒸發阻力係數r a及葉內層水蒸氣擴阻力係數r l（t），從ACTA Horticultrual 174，1985，“Greenhouse Climate and its Control”，p 95[3]中可查得r a＋r l（t）約0.132〔hr／m〕其時間變化曲線圖如下：



6.水蒸發潛熱

水蒸發潛熱 μ從“環境工學入門”[16]p.131可知

$\mu = 597 - 0.58\theta$ 〔Kcal／kg〕

θ：蒸發面溫度〔℃〕

7.⑴被覆材料之熱傳導係數kg，從“太陽能之應用及理論”[7]p.589中可查得，以玻璃為例

kg約0.68〔Kcal／m hr ℃〕

⑵水蒸氣質量傳遞係數km，從“被覆栽培の環境調節”[17]p.118中可查得

Km＝〔kg／m^2 hr〕為

Km＝h in（t）／Ca 強制對流時

Km＝h in（t）／0.93 Ca 自然對流時

其中 Ca＝Cpa＋Cpw x

Cpa：乾燥空氣之比熱，約0.24

Cpw：濕空氣之比熱，約0.441

x：絕對濕度，常溫時x約0.03

推得→Ca約0.25

8.⑴被覆材料單位面積之通風量h′ ven（t）〔M／hr〕，由定義推得

$$h'_{ven}(t) = \frac{V_g N(t)}{A_g}$$

N（t）：換氣回數〔回數／hr〕

⑵通風之對流係數 h ven（t）〔Kcal／m^2 hr ℃〕，

$$h_{ven}(t) = Ca \frac{V_g N(t)}{A_g}$$

Ca約0.25

⑴⑵中之換氣回數，從“被覆栽培の環境調節”p.115[17]中可查得

N（t）＝19.4＋ 3.6 V 全開窗

N（t）＝ 9.7＋ 1.3 V 半開窗

N（t）＝2.37＋0.51 V 不開窗

V＝表風速

9.比熱

⑴土壤之比熱Cs〔Kcal／M℃〕，從“被覆栽培の環境調節”p.52[17]中，依土壤種類之不同而異，其值大約在400～700之間。

⑵植物之比熱Cpl〔Kcal／M ℃〕，從“農業氣象”Vol 43 (2)，1987”[18]p.115中可查得

$$C_{pl} = \frac{a \times M}{LA \times LT} \times 10^3$$

其中

a＝（0.008W＋0.02） 〔Kcal／g ℃〕

M ：葉重 〔 g 〕
LA ：葉面積 〔 cm^2 〕
LT：葉厚 〔 cm 〕
W：葉之含水量〔 % 〕

10.飽和比濕度Ws(θ)〔 kg／kg′ 〕，從“ASAE 1971” p 969[13]中可查得

$$Ws(\theta)=0.622\ \frac{P(\theta)}{P-P(\theta)}$$

其中

$P(\theta)=1\ E\ \beta$

$\beta=-7.90298(Ts/T-1)+5.02808\ Log(TS/T)$
$-1.3816\ E-7\ *\ \{1E[11.344(1-T/Ts)]-1\}$

$Ts=373.16°K$

$T=\theta+273.16°K$

P：大氣壓〔 atm 〕

11.遮蔽係數fs(t)

遮蔽係數乃日照引起骨架之遮影面積率，由於骨架之投影隨太陽位置即時間而變，相當複雜，不易計算故在此將其改為定數其計算式如下：

$$fs(t)=1-\frac{\text{骨材面積}}{\text{覆蓋物總面積}}$$

12.透過率[13][14]

⑴被覆材料直接日照面之平均透過率 $\tau d(t)$，其值隨時間即太陽位置而異，其計算式如下：

$\tau d(t)=\{\Sigma\ Agj\ \tau g(\Psi j)\}/Ag$

其中

$\tau g(\Psi)=(1-Z)^2\ b/(1-Z^2\ b^2)$

$b=EXP(-0.45\ lg')$

$lg'=lg/\{[1-Sin^2\ \Psi]/n^2\}^{1/2}$

n ：以玻璃為例，約1.526

Ψj：為被覆材料對太陽之傾斜角

lg ：為被覆材料厚度

⑵被覆材料平均有效透過 $\tau g(t)$，此處之透過率是指光照透過被覆材料而能照射在溫室內土壤之透過率故加個“有效”二字，且其“平均”是對土壤面積之平均，其計算式為

$\tau g(t)=\{\Sigma Asj\ \tau g(\Psi j)\}/As$

As ：表土壤面積

Asj：表第 j 塊被覆材料投射在溫室內土壤所佔之面積

⑶被覆材料平均透過率 τs，此透過率是指不論日照面與否，只與材質有關之透過率，同樣地，被覆材料種類相當多，若以玻璃為例，根據“ASAE 1971” p 969～970可查得約0.7～0.9之間。

13.日照比率[13][14]

⑴被覆材料直接日照之比率 $\lambda(t)$，依定義知 $\lambda(t)$ 為受日照面面積和除以被覆材料總面積，同理此值亦隨時間即太陽位置而變，其計算式如下：

$\lambda(t)=\{\Sigma Agj\}/Ag$ 當 $\Psi j>0$

⑵被覆材料內表面受間接日射之比率 $\delta(t)$，所謂間接日射面即陽光經由土壤反射或穿透直接日照面而照在被覆材料內表面者，而此面積與總面積之比率即 $\delta(t)$，其算式如下：

$\delta(t)=\{\Sigma Agj\}/Ag$ 當 $\Psi j<0$

14.長波輻射量

⑴被覆材料對天空之長波淨輻射量Rlg(t)〔 Kcal／m^2 hr 〕，從“環境工學入門”[16] p. 136可查得

$Rlg(t)=[\varepsilon g\sigma\ Tog^4(t)]-[\varepsilon g\ f(Pw)\ \sigma\ Tou^4(t)]$ 其中

$f(Pw)=(0.51+0.076\ P^{1/2})(1-CN)+CN$[19]

P ：外氣水蒸氣壓(mmHg)

C ：雲之種類，此為0～1之經驗值大略為0.8左右

N ：雲量亦為0～1之經驗值

⑵土壤對大氣之長波淨輻射量Rls(t)〔 Kcal／m^2 hr 〕同理

$Rls(t)=[\varepsilon s\ \sigma\ Tos^4(t)]-[\varepsilon s\ f(Pw)\ \sigma\ Tou^4(t)]$

15.直達日照量及漫射量

⑴水平直達日射量Rsd(t)〔 Kcal／m^2 hr 〕，從“空氣調合計算法“p.50～60[11]中可得其計算式如下：

$Rsd(t)=J_0\ P**(\csc h)/r^2$

其中

J_0：太陽常數約1164〔 Kcal／m^2 〕

P ：大氣透過率，在四.㈢.3節中討論過

h ：太陽高度

r ：地球與太陽間之平均動徑，其值約為 1 左右

⑵漫射量Rss(t)〔 Kcal／m^2 hr 〕，亦從“空氣調合計算法”[11] p.50～60中可知其計算式為

$$Rss(t)=\tfrac{1}{2}J_0\ Sin\ h\left\{\frac{1-P**(\csc h)}{1-1.4\ Ln(P)}\right\}$$

六、數理資料分析

本節所要討論的是本模擬所用的一些數值方法，由於數值方法相當多，在選擇上考慮到本模擬程式之用途是作為預測之用，故在電腦運算上不希望耗費太久，而選擇較簡便而精度可控制之數值方法，以達快速模擬之成效。

㈠最小二乘法原理的推廣應用

在前面已談及我們放棄了 Fourier Series 及 Euler Formula 而改用多項式迴歸來求外氣溫、濕度係數曲線多項式，此迴歸理論主要根據最小二乘法之原理，主動方追加運算，求得最小誤差後，停止運算，而得其多項式，其推導如下：

$$Y = f(X) = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \cdots\cdots + a_n X^n$$

$$\Rightarrow$$

$$\begin{aligned}
\Sigma Y_i &= a_0 \Sigma 1 + a_1 \Sigma X_i + a_2 \Sigma X_i^2 + \cdots\cdots + a_n \Sigma X_i^n \\
\Sigma X_i Y_i &= a_0 \Sigma X_i + a_1 \Sigma X_i^2 + a_2 \Sigma X_i^3 + \cdots\cdots + a_n \Sigma X_i^{n+1} \\
\Sigma X_i^2 Y_i &= a_0 \Sigma X_i^2 + a_1 \Sigma X_i^3 + a_2 \Sigma X_i^4 + \cdots\cdots + a_n \Sigma X_i^{n+2} \\
\Sigma X_i^3 Y_i &= a_0 \Sigma X_i^3 + a_1 \Sigma X_i^4 + a_2 \Sigma X_i^5 + \cdots\cdots + a_n \Sigma X_i^{n+3} \\
&\vdots \qquad\quad \vdots \qquad\quad \vdots \qquad\quad \vdots \\
\Sigma X_i^n Y_i &= a_0 X_i^n + a_1 \Sigma X_i^{n+1} + a_2 \Sigma X_i^{n+2} + \cdots\cdots + a_n \Sigma X_i^{2n}
\end{aligned}$$

$$(\Sigma Y_i \quad \Sigma X_i Y_i \quad \Sigma X_i^2 Y_i \quad \Sigma X_i^3 Y_i \cdots\cdots \Sigma X_i^n Y_i) =$$

$$(a_0 \ a_1 \ a_2 \cdots\cdots a_n) \begin{bmatrix} \Sigma 1 & \Sigma X_i & \Sigma X_i^2 & \cdots\cdots & \Sigma X_i^n \\ \Sigma X_i & \Sigma X_i^2 & \Sigma X_i^3 & \cdots\cdots & \Sigma X_i^{n+1} \\ \Sigma X_i^2 & \Sigma X_i^3 & \Sigma X_i^4 & \cdots\cdots & \Sigma X_i^{n+2} \\ \Sigma X_i^3 & \Sigma X_i^4 & \Sigma X_i^5 & \cdots\cdots & \Sigma X_i^{n+3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Sigma X_i^n & \Sigma X_i^{n+1} & \Sigma X_i^{n+2} & \cdots\cdots & \Sigma X_i^{2n} \end{bmatrix}$$

$$[A] \ [X] = [Y]$$

$$[A] = [Y] \ [X]^{-1}$$

故〔A〕＝（a_0，a_1，a_2，……a_n）矩陣可求得，至於 n 到第幾項最適合，其關鍵在於其誤差值大小，可由電腦運算其值，如（n＋1）項之誤差值大於第n項，表示自第（n＋1）項後可能發散，取n項即可。

由於此為迴歸方程式並非真正之公式，故初始比較發現在0時及24時之值有跳階（jump）現象發生，無法連續，為了克服此現象在0時前多加了23時之值，及在24時前多加了 1 時的資料，來消除 jump 現象，最後所得之迴歸公式較平滑且連續。

㈡迭代法之應用

在模擬時如覆蓋有結露現象產生，則須利用迭代法，求出覆蓋物之溫度，其原理如下：

$$f(X) = ax^n + bx^{n-1} \cdots + c = 0$$

令 $X = g(X)$ 若 $f(r) = 0$ 則 $r = g(r)$

故令有一起始值X_0代入$g(X)$可求出X_1代入$g(X)$求出X_2值，依此循環直到X_{n+1}與Xn誤差在容許範圍之內即可，此即迭代法。

若定義 $\quad \Delta X_i = X_{i+1} - X_i$

則 $\quad \Delta^2 X_i = \Delta(\Delta X_i) = \Delta(X_{i+1} - X_i) = X_{i+2} - 2X_{i+1} + X_i$

採用 Aitken 加速收斂法

$$r = X_n - \frac{(\Delta X_n)^2}{\Delta^2 X_n} = \frac{X_n X_{n+2} - X_{n+1}^2}{X_{n+2} - 2X_{n+1} + X_n}$$

故只需先迭代出三個值Xn，X_{n+1}，X_{n+2}，再以此三數代入上式，求出較正確之 r 值，即可加快其收斂速度。

㈢Runge－Kutta－Gill方法之應用

Runge－Kutta－Gill方法[20]為解聯立常微分方程式的利器，其優點在收斂快，記憶容量小，節省不少運算空間。其公式如下：

$$Y_{n+1} = Y_n + [K_1 + (2 - \sqrt{2}) K_2 + (2 + \sqrt{2}) K_3 + K_4] / 6$$

其中

$$K_1 = hf(X_n, Y_n)$$

$$K_2 = hf(X_n + 0.5h, Y_n + 0.5h)$$

$$K_3 = hf(X_n + 0.5h, Y_n + [(\sqrt{2} - 1)/2)] K_1 + [(\sqrt{2} - 1)/\sqrt{2}] K_2$$

$$K_4 = hf(X_n + h, Y_n - (\sqrt{2}/2) K_2 + [(\sqrt{2} + 1)/\sqrt{2}] K_3$$

若令

$$a_1 = K_1$$

$$a_2 = (-2 + 3/\sqrt{2}) K_1 + (2 - \sqrt{2}) K_2$$

$$a_3 = -0.5 K_1 - (1 + \sqrt{2}) K_2 + (2 + \sqrt{2}) K_3$$

則若已知Xn，Yn，h值時Y_{n+1}為

步驟 1：

$$K_1 = hf(X_n, Y_n)$$

$$Y_{n+1}^{(1)} = Y_n + 0.5 K_1$$

$$a_1 = K_1$$

步驟 2：

$$K_2 = hf(X_n + 0.5h, Y_{n+1}^{(1)})$$

$$Y_{n+1}^{(2)} = Y_{n+1}^{(1)} + (1 - \sqrt{2}/2)(K_2 - a_1)$$

$$a_2 = (-2 + 3/\sqrt{2}) a_1 + (2 - \sqrt{2}) K_2$$

步驟 3 ：

$$K_3 = hf(X_n + 0.5\,h,\ Y^{(2)}_{n+1})$$
$$Y^{(3)}_{n+1} = Y^{(2)}_{n+1} + (1+\sqrt{2}/2)(K_3 - a_2)$$
$$a_3 = -(2+3/\sqrt{2})\,a_2 + (2+\sqrt{2})\,K_3$$

步驟 4 ：

$$K_4 = hf(X_n + h,\ Y^{(3)}_{n+1})$$
$$Y^{(4)}_{n+1} = Y^{(3)}_{n+1} - (1/3)\,a_3 + (1/6)\,K_4$$

由步驟 4，所求得之 $Y^{(4)}_{n+1}$ 即為所求之值，此法所以較為人所使用，其原因在於每一步驟均以新求之Y_{n+1}值代入運算，使誤差縮小，收斂速度加快。

㈣電算求形態係數之方法

在本模擬程式中，長波輻射量之計算，形態係數是一重要角色，且一般溫室形狀，又不是矩形盒狀，如用查表方式推求，不但費時，遇到兩面間不平行或垂直時，必束手無策，筆算更不用講了，故我們採用了最基本的原始方法，從其基本公式

$$\Phi_{12} = \frac{1}{S_2}\int_{S_1}\int_{S_2}\frac{\cos B_1 \cos B_2}{\pi r^2}\,dS_2\,dS_1$$

著手，採用辛蒲生三分之一法則（Simpson method），重複來解。其法則公式如下：

$$\int_a^b f(X)\,dx = \frac{h}{3}[f_1 + 4f_2 + 2f_3 + 4f_4 + \ldots + 2f_{n-1} + 4f_n + f_{n+1}] -$$
$$\frac{(b-a)}{90}h^4 f^{iv}(\xi) \qquad X_1 < \xi < X_{n+1}$$

此法雖古老卻非常簡便。同理亦可用梯形法則，及其它方法也可以解得，採用 Simpson method 之原因，在其精確度較高，運算過程快，唯一缺點是兩輻射面都為矩形面，所以遇到非矩形面時，必須先分割為矩形面，再合計每面之形態係數。

七、結果與討論

㈠尚待驗證的結果

本次研究至目前為止，已將程式繕寫完畢，亦已上機除錯完成，然在模擬時一切初始值之輸入，均為經驗值亦即假定值，其模擬之結果只能依觀念來判斷其合理性，而無實測值可比較其準確性，而且此假定經驗值可能較不正確或較不適合於台灣氣候，尤其在地溫方面更需要正確之初始值，有慮於此，本人擬安排一次現場實測資料之蒐集，以實測之初始值輸入程式中模擬，以其模擬結果與實測值進行比對，進一步的修改模式，在此僅將模擬過程中及現階段之模擬結果概略討論之。

1.在模擬過程中，為了解諸因子對溫度之影響程度（亦可稱為權重），我們試圖改變變因，發現植物及土壤對光線之吸收率大大影響了植物及土壤本身之溫度，只要增加其吸收率0.1，就可使植物及土壤溫度增加5～10度，此比率相當驚人，亦說明了吸收率之重要性。

2.同理土壤乾度實驗常數，也影響了濕度變化，只要由0.05增加至0.1，則濕度變化頗巨，故土壤乾度實驗常數最好以實驗值為準。

3.模擬後之結果顯示，發現在不加溫之溫室內，晚上午夜過後其溫室內溫度反而比外界氣溫低。其原因乃密閉之溫室在午夜後無日照之能量來源，反之不斷地向天空放出長波輻射熱量又無法由室外獲得能量補充，故室內溫度下降較室外為低，且此現象在小面積之溫室尤著。故在冬天不加溫之溫室晚上將其打開“凍死”植物之機會將較密閉之溫室為少。田間作物防寒措施就不該以塑膠袋全面覆蓋，而應使用稻草，或以有穿孔之塑膠布覆蓋。

一般而言，本次模擬所得之結果，依觀念判斷還相當合理，但仍望能以實測結果相比較，將可提高此模式之可信度，且亦較為有力。

㈡意見與建議

如能在植物生理資料方面有更充實的資料，則可加入生長速度之估計及二氧化碳濃度平衡的計算；另外在雲量對日射量之影響方面有關資料太少，而且雲之種類、厚度、寬度分佈狀況、形狀，要十分正確的估計，幾乎不可能，所以在本模式中，把雲量（CC）值對直射日射量之影響定在CC／10亦即若CC值為10則無直接日射，若CC值為0，則為大晴天，有完全日射，而在水平面漫射量則以下式來決定：

水平面漫射量＝晴天水平面漫射量＋16.737×CC×α／90°

α：表太陽高度角

以上兩者均是從有關太陽能理論一書中，推敲而來，正確性乃需驗證探討，亦希望研究大氣科學的學者，能提出更正確的公式，來改正此一計算方式。本系統程式要被修改之處仍相當多，因限所學，許多缺點尚未覺查者望高明之不吝指正。

參考文獻

1. 設施園藝研討會專集 1987 P185～193，P125～143。
2. 陳寶玉譯 1986 溫室管理 五洲 P17～53，P135～230。
3. Acta Horticulturae 174, 1985. “Greenhouse Climate and Its Control”, P21–35, P87–105, P393–401.
4. 公曉嵐、黃銘山譯 1987 熱力學 乾泰圖書 P31～P87。
5. 楊春欽、毛迪譯 1985 熱傳遞學 科技 P2～422，P495～513。
6. 蘇金佳譯 1982 太陽能工程原理（上冊） 科技 P34～187。
7. 黃文雄 1978 太陽能之應用及理論 協志工業叢書 P19～118，P126，P589。
8. 王錦堂 1977 建築應用物理學 台隆書店 P183～197，P265～366，P401～408。
9. 蓑輪雅好 1986 香川大學農學部紀要第47號“開放型畜舍 の 放射熱環境に關す. る研究” P31～53，P75～92。
10. 于若石 1979 畜舍內溫度與濕度控制設計模式之研究 台大農工所碩士論文 P13～49。
11. 宇田川 光弘 1986 空氣調和計算法 オーム社 P26～159。
12. Esmay, M. L. and J. E. Dixon. 1986 “Environmental Control for Agricultural Build-

ings", AVI, P 1–285.
13. Takakura, T. K. A. Jordan and L. L. Boyd. 1971 Dynamic Simulation of Plant Growth and Environment in the Greenhouse. Trans. of the ASAE, P 964–971.
14. D. P. Froehlich, L. D. Albright, N. R. Scott, P. Chandra. 1979 Steady-Periodic Analysis of Glasshouse Thermal Environment. Trans. of the ASAE, P 387–398.
15. 郭魁士　1985　土壤學　中國書局　P409～571。
16. 蔵田憲次、岡田益己　1984　環境工學入門　株式會社サイエンスハウス　P1～149。
17. 小蒼祐幸　1985　被覆栽培の環境調節　農林統計協會　P38～54，P113～118。
18. 農業氣象Vol 43（2）　1987　p113～120。
19. 賴鵬程　74年　太陽能系統分析與設計　全華科技圖書　P1～43，P307～323。
20. Gerald, C. F. and P. O. Wheatley. 1985 "Applied Numerical Analysis", P 337–343, P 247–326, P 580–629.

附　錄　1　　符　號　說　明

Ag　：被覆材料表面積〔 ㎡ 〕
Ah　：加熱器之表面積
Ap　：葉子表面積
As　：土壤之表面積
Asj　：表第j塊被覆材料投射在溫室內土壤所佔之面積
Ca　：空氣之定壓比熱，約0.25〔 Kcal／㎥ ° K 〕
Cgj　：被覆材料對j物體之溫度積〔 ° K³ 〕
Cpa　：乾燥空氣之比熱，約0.24
Cpl　：植物之比熱〔 Kcal／㎥ ° K 〕
Cpw　：濕空氣之比熱，約0.441
Cs　：土壤之比熱〔 Kcal／㎥ ° K 〕
E　：均時差
fs（t）　：遮蔽係數
h　：太陽高度
hih（t）　：加熱器之對流係數〔 kcal／㎡ hr ℃ 〕
hin（t）　：被覆材料內表面之對流係數〔 Kcal／㎡ hr ℃ 〕
his（t）　：室內土壤之對流係數〔 Kcal／㎡ hr ℃ 〕
hou（t）　：材料外表面之對流係數〔 Kcal／㎡ hr ℃ 〕
hven（t）　：表單位被覆材料面積之通風量〔 m／hr 〕
j　：表被覆材料、植物、土壤、加熱器…等
Jo　：太陽常數約1164〔 Kcal／㎡ 〕
Kg　：被覆材料之熱傳導係數〔 Kcal／m hr ℃ 〕
Km　：水蒸氣質量傳導係數〔 kg／㎡ hr 〕

Ks　：土壤之熱傳導係數〔 Kcal／m hr ° K 〕
L　：經度（東經為正，西經為負）
Lg　：被覆材料之厚度〔 m 〕
Ls　：標準子午線經度（東經為正，西經為負）
r　：地球與太陽間之平均動徑，其值約為1左右
ra　：葉表面蒸發阻力係數〔 hr／m 〕
risp　：溫室內地表之反射率
rl（t）　：葉內層水蒸氣擴散阻力係數〔 hr／m 〕
ros　：土壤之反射率
Rdd（t）　：直接日射量
Rlg（t）　：被覆材料外表面之長波淨輻射量
Rsd（t）　：水平面直達日射量
Rss（t）　：漫射量
t　：表時角，真太陽時之正午為0°，午前為負，午後為正，一小時15° 之分割
ta　：真太陽時
ts　：標準時
μ　：水蒸氣蒸發或凝結之潛熱容量〔 Kcal／kg 〕
Vg　：溫室內空氣體積〔 ㎥ 〕
Vp　：植物之體積
Win（t）　：室內空氣之比濕度
Ws（θig）　：飽和比濕度
X　：絕對濕度，常溫時X約0.03
αg　：被覆材料之吸收率
αp　：植物之吸收率
τd（t）　：平均被覆材料透過率（受日照面）
τg（t）　：平均被覆材料有效透過率
τm　：大氣透過率
τs　：平均被覆材料透過率
εg　：被覆材料之射出率
εj　：j物體之射出率
σ　：波茲曼常數（Stefan-Boltzmann Coef.）約4.88 E-8〔 Kcal／㎡ hr ° K⁴ 〕
ρ　：表空氣密度〔 kg／㎥ 〕
δ　：表太陽赤緯，春分、秋分 δ＝0°，春至 δ＝23° 27′，冬至 δ＝-23° 27′
δ（t）　：被覆材料內表面直接日照之比率
Ψ　：表緯度，北半球Ψ＞0，南半球Ψ＜0
Ψj　：為被覆材料對太陽之傾斜角
θog（t）　：被覆材料外表面溫度
θou（t）　：外氣溫

λ（t）　：材料外表面直接日照之比率
$\eta$is　：內部土壤對被覆材料內表面之形態係數
ηg　：被覆材料對天空之形態係數
ηgj　：被覆材料對j物體之形態係數
ηss　：土壤對被覆材料之形態係數
ζig　：凝結實驗常數（此以被覆材料為標準定為1）
$\zeta$is　：表內部土壤水蒸發實驗常數

討　論

高德錚（台中區農業改良場）問：

模擬程式是否符合於現行台灣實際溫室內的微氣候？

邱文山（台灣大學農工系）答：

此模式到目前為止尚未與溫室做實測比對，僅探討對其合理性。

陳加忠（農試所農機系）問：

此模擬中大氣之溫度、濕度是採用美國ASHRAE（1977年）之標準，美國大陸型氣候十分穩定，而台灣海島型地形氣候多變，此ASHRAE標準是否適用？模擬理論需要實測數據加以檢驗，才能判別其正確，請問實測值與模擬結果理論值之間如何判別其符合性？即兩者差異之容忍誤差為何？

王鼎盛（台灣大學農工系）答：

此控制模式在模擬情況下完成，實際情形尚需比對探討。

THE MATHEMATICAL MODEL OF TEMPERATURE AND HUMIDITY CONTROL FOR GREENHOUSES

Tin-sen Wang and Wen-shan Chiu

Associate Professor, Graduate student, Department of Agricultural Engineering, National Taiwan University.

ABSTRACT

The factors influence the environment of greenhouse include weather and non-weather factors. The most important factors affect the growing of the plants are temperature and humidity. The purpose of this research is the established a mathematical model of temperature and humidity control for the greenhouses. The model is based on the theory of steady state heat transfer and mass conservation Department In addition, the mathematical model referenced the evapotranspiration of plants and constructed a numerical scheme to evaluate and manage the temperature and humidity. The outgoing of simulations are adopted from the experimental studies with different types greenhouses in Taiwan. Consequently, the results will provide the most economical and suitable ventilation, heating, and cooling.

The characterization of this model are combined the weather bureau report and mathematical simulation, but not depends the instant data by means of sensor response. The main feature of this model is prediction the short time temperature and humidity fluctuation.

In addition, the model will be not only prediction of humidity and temperature, but also provide a guideline of ventilation, heating and cooling systems for the greenhouses. The numerical program has been written in FORTRAN language in order to be used widely.