

熱傳導係數測定器之研製及應用 於農產品之測定

Construction of Thermal Conductivity Probe and its Application to Measure Agricultural Products

中華工專講師

國立臺灣大學農機系教授

萬 一 怒

蕭 介 宗

Yee-Nu Wan

Jai-tsung Shaw

摘 要

應用「線熱源法」，製作熱傳導係數測定器並利用個人電腦直接接收 Autodata Ten/5 數值溫度記錄器的數值溫度訊號，以加速熱傳導係數測定值的獲得。測定裝置經測試蒸餾水加 0.4% 洋菜膠的熱傳導係數做為校正後，用來測定稻穀、洋葱、甘藍和胡蘿蔔的熱傳導係數。

臺農67號稻穀在含水率從 12.2% 到 27.5% (濕基) 和溫度從 4°C 到 40°C 之範圍內，熱傳導係數變化範圍在 0.0858 W/m°C. 到 0.1343 W/m°C. 之間。

洋葱含水率 92.2% (濕基) 和在溫度為室溫時熱傳導係數為 0.455 W/m°C.。

胡蘿蔔含水率 90% (濕基)，在溫度為室溫時，熱傳導係數為 0.546 W/m°C.。

甘藍的熱傳導係數，隨密度的增大而增大，在含水率 94% (濕基)，室溫下，密度為 570 kg/m³ 到 590 kg/m³ 時，熱傳導係數為 0.275 W/m°C.，當密度大於 650 kg/m³ 時，熱傳導係數為 0.365 W/m°C.。

Abstract

Applying the line heat source method to construct a thermal conductivity probe and applying the personal computer to receive digital signal from Autodata Ten/5 Data Logger, the measurement of thermal conductivity can be speeded up. After the apparatus was calibrated by measuring the thermal conductivity of distilled water with 0.4% agar, it was used to determine thermal conductivities of rough rice, onion, cabbage and carrot.

With moisture content range between 12.2% and 27.5% and temperature range between 4°C and 40°C, the thermal conductivity of rough rice varies from 0.0858 W/m°C to 0.1343 W/m°C.

The thermal conductivity of onion with 92.2% moisture content is 0.455 W/m°C in room temperature.

Similarly, the thermal conductivity of carrot with 90% moisture content is 0.546 W/m°C in room temperature.

However, the thermal conductivity of cabbage increases as its bulk density increases. With bulk density range from 570 to 590 kg/m³, the thermal conductivity of cabbage having 94% moisture content is 0.275 W/m°C in room temperature. When the bulk density is above 650 kg/m³, the thermal conductivity is 0.365 W/m°C.

一、前 言

熱傳導係數測定的方法有許多種，穩定狀態熱流法是很早即被使用的方法，但是以此種方式測定熱傳導係數，需要經過好幾小時的時間，始能達到平衡狀態。同時對於含水率超過10%（濕基）的物質，則會因為固定溫度差而引起水份的移動 [10]*。這些缺點使得穩定狀態熱流法在測高含水率農產品的熱傳導係數上受到限制。

本實驗採用圓柱體中心線熱源法 [6] (Line heat source method)，測熱傳導係數，這種方式曾經廣泛的被使用在測定土壤 [6]、花生 [14]、王蜀黍 [8]、蕃茄汁 [4] 等等的熱傳導係數上；此種熱傳導係數測定方式所具有的優點為：

1. 在低含水率物質的熱傳導係數測定上，能得到和穩定狀態熱流法同樣精確的值 [10]。
2. 在不影響溫度量度的準確性下，只需要微小的溫度差即可測定。
3. 測定時間少則數十秒至多十分鐘即可。
4. 適用範圍很廣，包括測試工業上均質產品，高含水率農產品，保溫絕熱材料、混凝土、土壤、流體等等。
5. 輕便、可攜帶至現場，在天然條件下測試。
6. 改良後，可同時測熱擴散率。
7. 構造簡單，價格便宜。

由於農產品的貯藏、加工和乾燥等等的研究，熱傳導係數是一項很重要的基本資料，雖然在書籍和國外專門雜誌上可以查到一些數據資料；但是農產品本身因品種和生長環境的不同而有不同的結構，成份和排列狀況，導致於不同品種和地區的農產品熱傳導係數的差異，需要的熱傳導係數值遍查不到。基於事實上的需要，製作一個方便且精確的熱傳導係數測定系統是必要的。本研究目的有下列二項：

1. 製作熱傳導係數測定器，並與近來普遍的個人電腦連接，以增快熱傳導係數值的獲得。
2. 以校正好的熱傳導係數測定系統，實際測定稻穀、洋蔥、胡蘿蔔和甘藍幾種農產品的熱傳導係數。

* [] 內數字為附錄參考文獻編號。

二、文 獻 探 討

圓柱體中心線熱源法，測熱傳導係數的原理，是假定在半徑和長度都是無限大的圓柱體內，於中心軸有一條無限長且無限細的熱源，此熱源以均勻且一定的強度放出熱量，此時靠近中心軸的溫度上昇和時間的對數值成線性關係，求得此斜率，即可依此斜率求得此圓柱體的熱傳導係數。

一圓柱座標軸向線熱源的熱傳關係式如下：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

而 T：溫度，°C

t：加熱時間，秒

a：熱擴散係數，m²/S

r：相對於熱源的徑向距離，m

下列式子，用以表明熱擴散率，熱傳導係數、比熱和密度之間的關係：

$$a = \frac{K}{C\rho} \quad (2)$$

K：熱傳導係數，W/m°C

C：為比熱，J/kg°C

ρ：為測試物密度，kg/m³

對一均質且初始溫度分佈為等溫的無限圓柱，線熱源以一定強度放出熱量，圍繞於熱源的溫度(T)分佈可以由公式(1)推導下：[6、7、11、14]

$$T = \frac{Q}{2\pi K} \int_{\beta}^{\infty} \frac{\exp(-X^2)}{X} dX \quad (3)$$

而 Q：加入的熱量，W

$$\beta = \frac{r}{2\sqrt{at}}$$

公式(2)經級數展開當β < 0.16時化簡成下式，誤差值在1%以內 [12、4]：

$$T = \frac{Q}{2\pi K} \left(\frac{-Ce}{2} - \ln\beta \right) \quad (4)$$

在 t₁ 和 t₂ 兩個時間，接近熱源的溫度差依據公式(4)，可以表示如下：

$$T_1 - T_2 = \frac{Q}{4\pi K} \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (5)$$

在使用熱傳導係數測定器時，由於熱傳導係數測定器本身有一微小管徑，且熱傳導係數測定器和測試物材質不同，二者的比熱不同和接觸面間的熱阻存在會造成微小差誤，這個誤差可視為實際開始加熱時間比開始測試熱傳導係數時間晚了 t₀ 秒 [6]

。 t_0 的計算可以用圖解法求得 [6]，當「加熱時間差」比「上升溫度差」= 0 時的 t 值即為 t_0 。

以圖解法算 t_0 值，因為需要畫圖，非常不便。所以，另有公式法可以由成線性後的直線方程式，直接推導得 t_0 如下 [12]：

$$t_0 = t_1 \text{Exp} \left((\Delta T - B) / A \right) \quad (6)$$

t_0 ：時間修正因子。

t_1 ：當上升溫度對時間對數值成直線後的任一參考時間。

ΔT ：為 t_1 時的溫度和初溫的溫度差。

A, B ：為成線性後係數常數 $\Delta T = A \text{Ln}(t) + B$

將 t_0 代入公式(5)，修正後的溫度與時間的關係式如下：

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi K} \text{Ln} \left(\frac{t_2 - t_0}{t_1 - t_0} \right) \quad (7)$$

理論上對於每一種物質，每一熱傳導係數測定器的 t_0 應該是一個不變的常數，由於熱傳導測定器和測試物間的熱阻變動， t_0 會有輕微的改變。

根據理論，測試熱源應為無限長，而作為測試物的農產品，其大小也有所限制，故實際上的熱傳導係數測定器若長與直徑比能大於 20 倍時即可 [14]。通常長度為直徑的一百倍，為人最常使用 [6]。

對於直徑較細的測試物所引起的誤差，在司威特 [15] 的報告中指出，當 $4at/d^2 < 0.6$ 時 (d 為測試品的直徑)，這一方面的誤差可以不予考慮。若測試物直徑較小時，可以減少測試時間 t 來改善。當測試物直徑較小，又經長時間加熱，可從升溫和時間的半對數座標圖上看出，在成直線部份的尾端斜率有逐漸降低的現象。

對於較短的測試物，同一份報告中 [15] 所做的實驗，以不同長度的水柱測試，結果水柱長度分別為 1.9 公分和 2.5 公分時，無明顯誤差出現。但測試物短到 1.3 公分以下時，就有誤差出現。

對於片狀材料，只要堆疊的够緊密，使得接縫處無空隙存在，就不致引起誤差 [6]。

測試時使用電流的大小，對熱傳導係數的測定無明顯影響 [9]，在不引起內部空氣對流，水份移動和測試物溶解的情況下，使用較高電流增高升溫，可降低溫度測定的誤差。

三、實驗裝置與儀器的校正

3.1 試驗裝置

3.1.1 熱傳導係數測定器的製作

熱傳導係數測定器構造如圖 1，製作程序如下：

(1) 使用外徑 0.48 公分鋁管和外徑 0.28 公分銅管，分別做成長短不同熱傳導係數測定器，規格如表 1。

(2) 中心發熱電阻絲使用 T 型熱偶線 (Thermal Couple) 合金線，外包覆絕緣鐵弗龍。測定溫度變化對電阻的影響，得到溫度為 20°C 時，電阻值是 6.3Ω/m。當溫度保持在 70°C 時，則電阻值為 6.36Ω/m。溫度的改變對電阻變化不大，約 0.0012Ω/m°C。

(3) 熱傳導係數測定器內，使用 0.3mm T

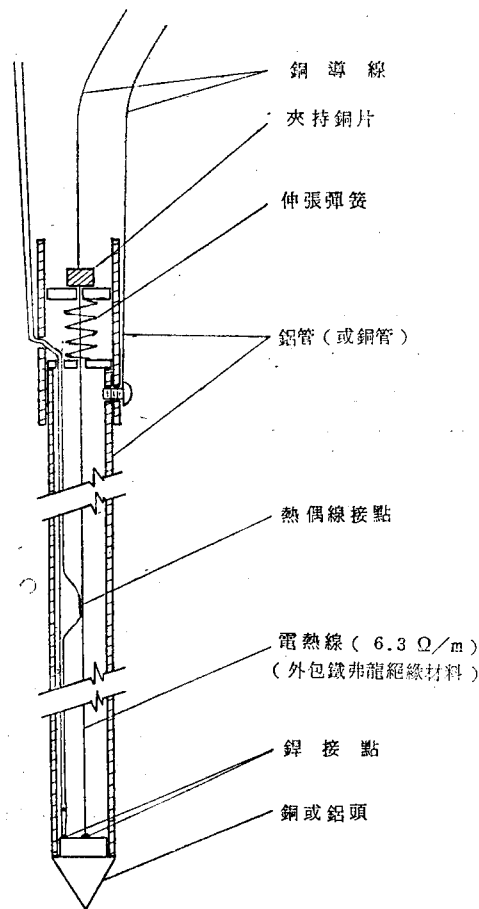


圖 1 熱傳導係數測定器剖面圖

型熱偶線一對，熱偶線接點緊附在電阻線中心，以極細尼龍線綁縛。

(4)在熱傳導係數測定器兩頭接縫處均塗上矽膠，保持熱傳導係數測定器在測試高含水率農產品和液體時，不會因液體的滲入而造成內部的腐蝕。

表 1 熱傳導係數測定器規格

編號	材質	外徑 (cm)	長 (cm)	長 外徑
PROBE 1.	鋁(Al)	.48	65	135
PROBE 2.	鋁(Al)	.48	53	110
PROBE 3.	鋁(Al)	.48	49	102
PROBE 4.	銅(Cu)	.48	16.5	60

3.1.2 溫度記錄系統

溫度記錄使用 Autodata Ten/5 Data Logger，多點數字溫度記錄器，此記錄器能自動將熱偶線測到的mV電壓訊號放大轉換成相關溫度。記錄上升溫度有效位數到小數一位。記錄器本身電路上設計有參考溫度值，所以熱偶線不需要另設冰點參考溫度測點。記錄輸出時間以秒為最小單位。記錄到的溫度，除了直接輸出到燈管顯示幕及列

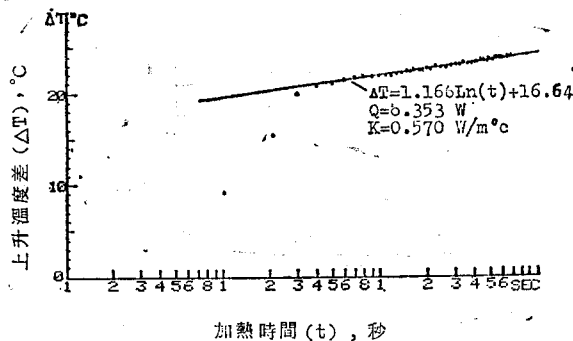


圖 2 典型的上升溫差對時間對數的半對數座標圖

印外，並且可經由 1040~10 串列信號輸出入界面，以美國國家標準碼 (ASC II) 輸出。這使得溫度記錄訊號能很方便的被電腦接收。

3.1.3 個人電腦的應用

以個人電腦RS-232C 界面卡從溫度記錄器直接輸入資料，並存入磁碟，當加熱停止後，可從顯示幕和印表機上得到如圖 2 的半對數座標圖，藉以選擇適當的線性開始時間，然後印出原始數據和電腦算得的熱傳導係數值。以上所述的程序在 3~5 分鐘內可完成。

3.1.4 加熱系統

加熱電源使用經用牌大型電話用 1.5 V 乾電池，數個串聯作為主要電源供應，電壓變化範圍在 3~7.5 V，由於乾電池在負載情況下，電流會隨時間增加而降低。所以另以一可變電壓直流電源串聯可變電阻作為補償電源，二電源負極相接，正極各串聯一個整流二極體相接。上述各項組成如圖 3，電路如圖 5 所示。由電源供應裝置出來的電流串接一個HP數字顯示三用表（顯示電流可讀到 0.1mA），再接到熱傳導係數測定器電阻線，電流的大小可供電流 0.3A 到 1.5 A，視串聯電池個數和熱傳導係數測定器電阻而定。其準確度到 1 mA。圖 4 為測定熱傳導係數裝置總成。



圖 3 加熱電源裝置

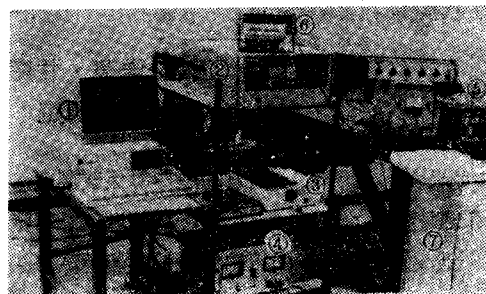


圖 4 測定熱傳導係數裝置總成

- ① 8 bit 電腦
- ② Autodata Ten 多點溫度記錄器
- ③ 印表機
- ④ 電源穩壓器
- ⑤ 加熱電源
- ⑥ HP 數字顯示三用錶
- ⑦ 測試中稻穀

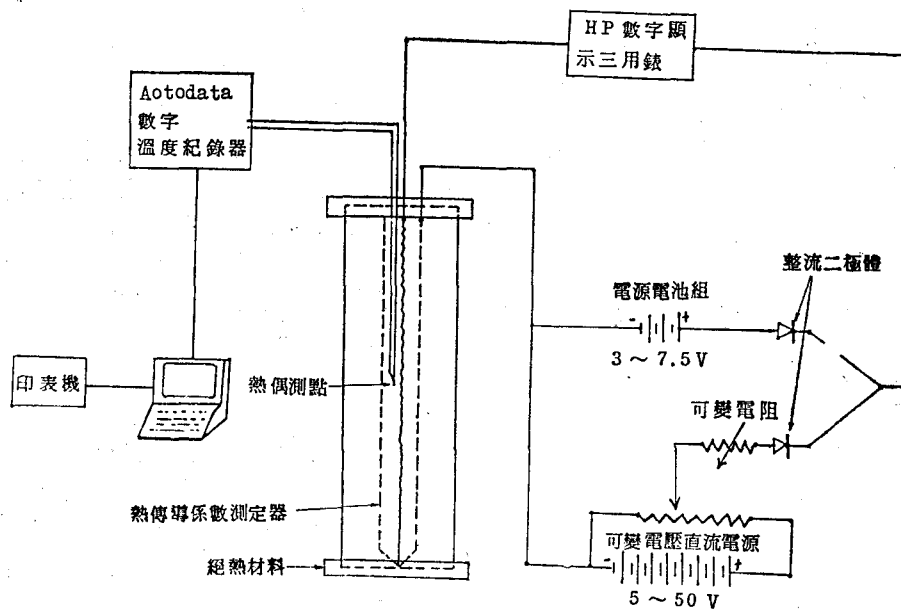


圖5 測熱傳導係數電路圖

3.2 熱傳導係數測定器的校正

水是一種安定的化合物，飽和水的熱傳導係數祇隨着溫度的變動而略有變化 [5]，故選擇水作為熱傳導係數測定器的校正基準。由於低黏滯性流體，在重力場中會因為溫度的不均勻，而有對流現象。為了阻止對流的產生，在蒸餾水裏加上水重量千分之四的洋菜膠 [15]，煮沸後凍成凝膠使用。

測試是在整筒水達到均溫時開始，通常放在冷藏箱中二十四小時以上。每次測試結果，先求得初溫和熱傳導係數值，當初溫不是 0°C 時，按水隨着溫度而改變熱傳導係數的變化值，從測得的熱傳導係數值中減去此溫度影響的變化值，即得各支熱傳導係數測定器測得 0°C 飽和水的熱傳導係數；0°C 時飽和水的熱傳導係數為 0.566W/m°C，與測得值比較結果發現誤差值多在 1% 以內。

時間修正因子 t_0 ，以公式(6)計算結果，遠小於 1 秒，對熱傳導係數的影響可以忽略不計。這是因為鋁管相對於水來說，熱傳導係數極大 202W/m°C，比熱較小 0.896KJ/kg°C，且水和鋁管接觸面的熱阻不大，故 t_0 很小。

雖然在測試水時，溫度記錄上升二十幾度，俟

電源一切掉後，九十秒內溫度迅速降回初溫，祇高出一度多。由此可知，在加熱時水的溫度上升很小，這可由熱傳導傅利葉公式看出：

$$Q = K \frac{A}{L} (T_{A1} - T_w) \quad (8)$$

T_{A1} ：熱傳導測定器內溫度

T_w ：包覆熱傳導測定器的水溫

L ：熱傳導距離

熱傳導測定器壁和水之間一直維持着固定溫度差。由於空氣和鋁的熱擴散率約為水的 $2 \times 10^2 \sim 6 \times 10^3$ 倍，所以熱傳導係數測定器內可視為均溫狀態。此點和胡柏、黎泊的實驗中發現熱偶線在熱傳導係數測定器內徑向位置對測定結果影響不大的現象符合。

四、稻穀、洋葱、甘藍和胡蘿蔔熱傳導係數的測定

4.1 稻穀的熱傳導係數測定

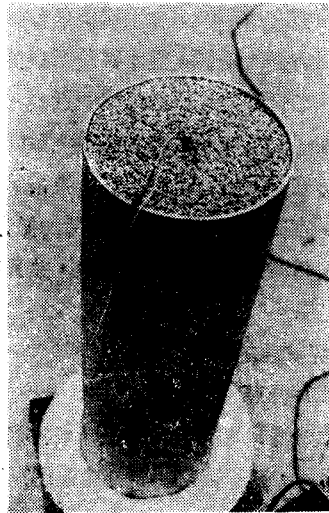
4.1.1 稻穀熱傳導係數測定的程序

選用的稻穀為嘉義地區二期稻，品種為臺農67號，濕穀採收第二天，從田區運回放入冷藏庫內，

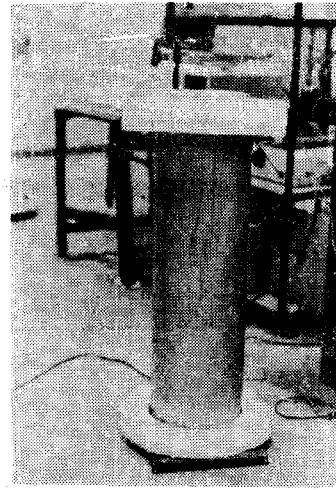
保持在 1°C 左右的溫度。分別在 27.5%、19.5% 和 12.2% 三種含水率情況下，以 4°C、20°C、40°C 三種初溫測試熱傳導係數。

同一批稻穀反覆測試，測試時從恒溫箱中取出稻穀，倒入大面盆中充份攪拌，然後倒入直徑 20.1 公分鋁筒中，每倒入全筒的三分之一，即提起鋁筒在放置有保麗板的地上頓擊十次，使稻穀的密度保持一定。裝滿稻穀後在中心軸垂直插入熱傳導係數測定器上下兩端以保麗板覆住，減少軸向熱流的損失〔3〕，裝置如圖 6，靜置約十五分鐘，等待內

部溫度平衡後，開始記錄初溫。每十秒記錄一次，共記錄十次。若中間變動大於 0.5°C，則重新開始記錄初溫，初溫記錄完成後接上加熱電源開始測熱傳導係數。電流使用 700mA，測試時間為十分鐘，開始的三分鐘內每五秒取一點；三到五分鐘時每十秒取一點；五分鐘以後每二十秒取一點。測試完的稻穀倒出圓筒，充份攪拌後，在設定溫度下靜置五小時以上再測。同一種條件下的稻穀重複測五次。



(a)：裝好待測之稻穀



(b)：測試中的稻穀兩端加上絕熱材料（測水亦同）

圖 6 稻穀熱傳導係數的測定裝置

密度測定使用 1000ml 的量瓶，裝滿 20°C 時的稻穀後測得穀重除以體積即得密度。裝瓶時隨時頓擊稻穀，以獲得最大密度。

4.1.2 稻穀熱傳導係數測定的結果和討論

稻穀熱傳導係數測定詳細結果列於參考文獻 1，熱傳導係數隨溫度和濕度的上升而增大。而濕度的影響比溫度的影響來得大，由此可見水份在生物體內對熱傳導係數的影響很大。利用最小平方差原理，推導得在 12.2% 到 27.5%（濕基）含水率，溫度從 0°C 到 40°C 範圍內熱傳導係數相對於含水率和溫度的公式如下：

$$K = 0.0579 + 0.00225M + 0.00028t$$

K：熱傳導係數 W/m°C

M：為含水率%，（濕基）

t：為溫度，°C

圖 7 和圖 8 為畫成熱傳導係數對溫度和熱傳導係數對含水率的圖形，由圖中可看出熱傳導係數對含水率和溫度在這段範圍內約略成線性關係。這點亦可從水的熱傳導係數來看，水在 0°C 到 50°C 時，熱傳導係數的變化近乎線性〔5〕。在 0°C 到 43.33°C 之間純水熱傳導係數對溫度變化的斜率為 0.0017，乘上 12.2%、19.5%、27.5%，分別為 0.0002、0.0003 和 0.0005 和圖 7 的斜率極端接近(1)。時間修正因子在稻穀熱傳導係數測定中小於 0.1 秒，無甚影響。

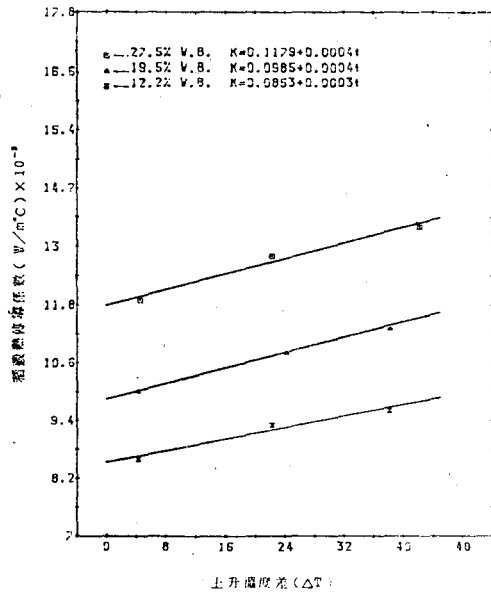


圖7 稻穀熱傳導係數對溫度變化的圖形

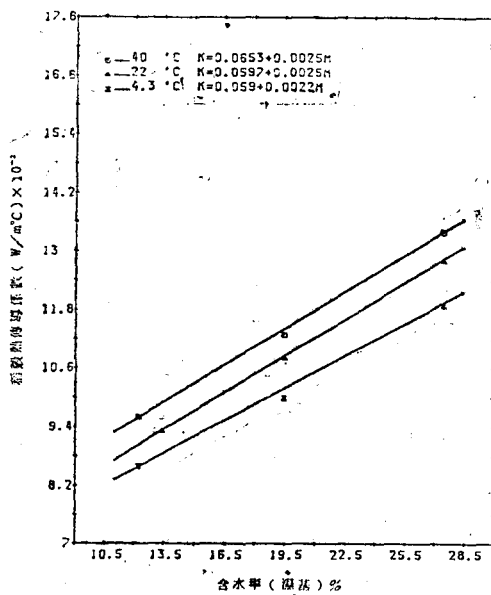


圖8 稻穀熱傳導係數對含水率變化的圖形

在相關的幾份報告中，雷特 [16]，測得稻穀的熱傳導係數在室溫情況下，從含水率12%到18% (濕基) 為 $0.102\text{W/m}^\circ\text{C}$ 到 $0.112\text{W/m}^\circ\text{C}$ ，導得與含水率關係式為：

$$K = 0.0866 + 0.0013M \text{ (W/m}^\circ\text{C)}$$

不過這份報告中，其使用電流讀到 0.01A，誤差為 $\pm 3\%$ ，每組只測三次其精確度應較差。

菲律賓農業工程研究機構 [13] 於1981年所測稻穀熱傳導係數，在含水率 8% 到 25%，溫度從 28.9°C 到 60.1°C 之間，熱傳導係數為 $0.0814\text{W/m}^\circ\text{C}$ 到 $0.1239\text{W/m}^\circ\text{C}$ 低於雷特所測，導得熱傳導係數對時間與含水率關係式為：

$$K = 0.052675 + 0.001384M + 0.000476t$$

但是其所測得密度在含水率 12%~19.5% 為 535kg/m^3 到 546kg/m^3 ，與本實驗所用稻穀密度不同。

由此二份已有資料可知，由於農產品本身在品種和生長環境有所不同，加上測試儀器的差異，故測試到的值有少許差異，惟本實驗所測得熱傳導係數範圍與此二份熱傳導係數值均極近似。

4.2 洋葱、甘藍和胡蘿蔔熱傳導係數的測定

洋葱等三種新鮮蔬菜直接從中央市場購得，除洋葱保存於室溫下，甘藍和胡蘿蔔均保存在 0°C ，相對濕度為90%的恒溫恒濕箱中，並且在一週內儘快測試完畢。

4.2.1 測試前的處理

4.2.1.1 洋葱

選用洋葱為PW種，產地在屏東枋寮，直徑約為7~9公分，近乎球形。將洋葱頭尾以刀切平，直徑在6公分以上，以鑽頭沿中心鑽一個略小於熱傳導係數測定器直徑的小孔，將數個洋葱以平面對平面密接，然後將熱傳導係數測定器從上到下沿孔插入，上下二端平面以保麗板覆住，並略加壓力，使接觸面密接 [6]，如圖9，待溫度穩定後開始測熱傳導係數。

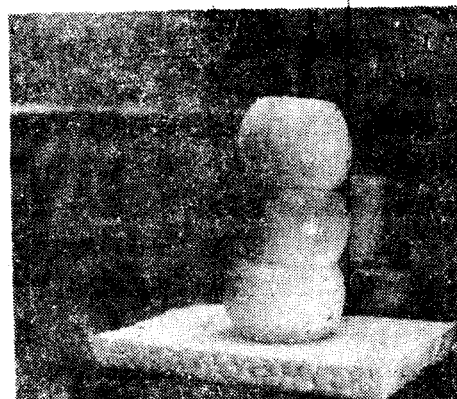


圖9 洋葱熱傳導係數的測定

測定含水率，以隨機取樣。取五組以上的洋蔥鱗瓣，以微量天秤測重量後，置於 105°C 烘箱中烤 24 小時，取出測失水後重量，算得含水率為 92.2% (濕基)。

測密度係根據阿基米得原理，量其排空同體積的水。先以 500ml 標準量瓶，測出 500ml 蒸餾水的重量，以算出 1 ml 蒸餾水的重，再將已剝表皮及測過重的洋蔥完全浸入裝滿水的容器內，量出排水量，即可獲得洋蔥體積，以計算密度。五次平均結果計算得密度為 980kg/m³。

以 16.5 公分長的熱傳導係數測定器測洋蔥熱傳導需用三個洋蔥相疊。為求證測試物相疊對熱傳導係數測定的影響，故以二公分厚，直徑五公分的保麗板 25 片堆疊，以編號 Probe 3、長 49 公分的熱傳導係數測定器，分別在 450mA 和 975mA 電流下測保麗板的熱傳導係數。測得保麗板熱傳導係數與一般報告上所有的保麗板熱傳導係數值 0.023 W/m°C [2]，極為接近。故得知測試物相疊緊密，對熱傳導係數測定無明顯的影響。

由一般熱性質表得知高含水率 70%~90% 農產品，其熱擴散率約略小於等於純水 [2]，純水的熱擴散率為 1.425×10⁻³ cm²/S 代入 4 at/d² 中，

$$\frac{4 \times 1.425 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{S} \times 600\text{S}}{(6 \text{cm})^2} = 0.095 < 0.6$$

故可知洋蔥測試直徑在十分鐘加熱期間，此項誤差可以不計，測試使用電流 955mA，每次測試後即更換洋蔥。

4.2.1.2 甘藍

甘藍為初秋種，產地為崙陽合作農場。測試前二天從冷藏箱取出置於室溫中，使與室溫達到平衡。甘藍一般為扁圓形，圓形直徑由 18 公分到 23 公分不等，上下長由 14 公分到 18 公分不等。16.5 公分長的熱傳導係數測定器橫向插入，可完全插入甘藍中。因此為求得甘藍的平均熱傳導係數，測試時有的以橫向插入，有的兩端削平將兩顆甘藍落在一起，從蕊旁插入測定器，如圖 10。

其含水率測定和測洋蔥含水率方法相同，在 105°C 烘箱中烘烤 24 小時，測得含水率平均為 94% (濕基)。

其密度測定亦採用阿基米得原理，只是在求排開水的體積時，先用塑膠袋套住甘藍，然後從內部抽氣，使塑膠袋依甘藍外形緊覆住，封住袋口然後完全壓入水中，測取排開水的重量，求得密度。



圖 10 甘藍熱傳導係數的測定

由於甘藍遠大於洋蔥，不致有半徑大小方面的誤差，測熱傳導係數均選用結構結實的甘藍，且每測試一次即更換。使用電流在 800mA 到 916mA 之間，讀到 1 mA，準確度在 1 mA 以內。

4.2.1.3 胡蘿蔔

胡蘿蔔採用板田種，產地為二林。測試前一天從冷藏箱取出，置於室溫中，使其與室溫達到平衡在胡蘿蔔之中，較大的中段直徑有 4.5 公分到 5.5 公分。故以一訂做好的，直徑 5.3 公分、長 9 公分的不銹鋼圓管，管口一端磨利、另一端反捲。沿軸向切削胡蘿蔔成圓柱形，兩端削平，中心鑽孔。取二段，甲段從中切成二小段置於乙段的上下兩端，熱傳導係數測定器從小孔穿入，待溫度穩定後再開始測試；乙段取較長的原因是為了使熱偶線測點正好在其中間，測試情形如圖 11。



圖 11 胡蘿蔔熱傳導係數的測定

胡蘿蔔含水率測定方法和測洋葱、甘藍相同，含水率為 90% (濕基)，密度測定結果為 1007 kg/m³。

以 4 at/d² 求直徑大小影響如下：

$$\frac{4 \times 1.425 \times 10^{-3} \text{cm}^2 / \text{S} \times 600 \text{S}}{(4.5 \text{cm})^2} = 0.17 < 0.6$$

根據司威特(5)，可知在10分鐘加熱時間內胡蘿蔔直徑够大故誤差可以不計。在預先做的一次長時間加溫的實驗中，發現加溫到十分鐘以上，斜率略有降低，故測試時加熱時間只到八分鐘，實際計算熱傳導係數只取五分鐘而已。每次測試電流不同，在623mA 到680mA之間，讀到 1 mA，準確度在 1 mA以內。

4.2.2 洋葱、甘藍和胡蘿蔔熱傳導係數測定的結果和討論

4.2.2.1 洋葱

洋葱共測試八次，求平均值，其結果如表 2，在 19°C 常溫下熱傳導係數為 0.455W/m²C，標準差 0.029W/m²C，時間修正因子 t₀ 經計算結果遠小於 1 秒，故不再代入公式計算。洋葱為鱗片結構，結構緊密，從縱切面來看均質性良好。但某些洋葱，內部生長分裂多至二頭以上，已有分離狀態，則會有空隙存在，此種洋葱測試時易引起較大的誤差，均捨棄不用。

表 2 洋葱的熱傳導係數

編號	初溫 (°C)	熱傳導係數 (W/m ² C)	
ONION 01	16	.402	
ONION 02	18	.456	
ONION 03	20	.508	
ONION 04	20	.444	S.D.=0.029
ONION 05	20	.471	
ONION 06	20	.459	
ONION 07	20	.456	
ONION 08	21	.455	
平均	19	.455	
PW種	含水率92.2%(濕基)	密度980kg/m ³	

4.2.2.2 甘藍

實驗選用的甘藍直接由中央市場購得，第一次採購在三月初，正值甘藍盛產期，顆粒大而結實，從中剖開可看出結構緊密，空隙很少，密度在 650kg/m³ 以上，測試結果見表 3，其熱傳導係數

為 0.365W/m²C，標準差 0.022W/m²C，而且測試時發現個體和個體間差異比較小。

表 3 甘藍的熱傳導係數

編號	初溫 (°C)	熱傳導係數 (W/m ² C)	
CABBAGE 001	19	.349	
CABBAGE 002	20	.344	
CABBAGE 003	18	.355	
CABBAGE 004	19	.336	S.D.=0.022
CABBAGE 005	19	.399	
CABBAGE 006	19	.380	
CABBAGE 007	19	.371	
CABBAGE 008	20	.384	
平均	19	.365	

初秋種 含水率94%(濕基)
密度：650kg/m³ 以上

第二次採購在五月初，已接近甘藍產期的尾聲，顆粒不均，並且結構鬆散，從中剖開可看到內部空隙較多，經測試密度在 570kg/m³ 到 590kg/m³ 之間，其熱傳導係數測試結果如表 4。標準差為 0.044W/m²C。個體和個體間差異較大。所以可知甘藍的熱傳導係數和其密度有關，密度愈大均質性愈好，局部差異較小，這是在測定洋葱、胡蘿蔔熱傳導係數時沒有的現象。時間修正因子 t₀ 經計算，小於 1 秒，可忽略不計。

表 4 甘藍的熱傳導係數

編號	初溫 (°C)	熱傳導係數 (W/m ² C)	
GABBAGE 101	21	.301	
CABBAGE 102	22	.310	
CABBAGE 103	25	.243	
CABBAGE 104	25	.239	
CABBAGE 105	25	.252	S.D.=0.044
CABBAGE 106	25	.351	
CABBAGE 107	25	.311	
CABBAGE 108	25	.244	
CABBAGE 109	25	.221	
平均	24	.275	

初秋種 含水率94%(濕基)
密度：570kg/m³~590kg/m³

4.3.2.3 胡蘿蔔

胡蘿蔔共測試十次，求取平均，其熱傳導係數

如表 5，在 20°C 常溫下，熱傳導係數為 0.546W/m°C，標準差為 0.055W/m°C；胡蘿蔔個體間熱傳導係數變化較大的原因。應是受其結構的影響，因胡蘿蔔中間心部和周圍組織極不相同，且形狀亦不規則，時間修正因子 t_0 在這裏亦小於 1 秒，影響小可忽略不計。

表 5 胡蘿蔔的熱傳導係數

編 號	初 溫 (°C)	熱傳導係數 (W/m°C)	
CARROT 01	20	.475	
CARROT 02	18	.602	
CARROT 03	19	.557	
CARROT 04	19	.485	
CARROT 05	20	.609	S.D.=0.055
CARROT 06	20	.631	
CARROT 07	20	.540	
CARROT 08	20	.550	
CARROT 09	21	.493	
CARROT 10	20	.518	
平 均	20	.546	

板田種；含水率90%(濕基)
密 度：1007kg/m³

五、結 論

1. 本文，以『圓柱體中心軸線熱源法』製作的熱傳導係數測定器及整個測試系統，以測試水的熱傳導係數作為測試系統的誤差校正，經多次改進後，測得水的熱傳導係數值比現有純水的熱傳導係數值大約 1%。並且本系統中使用了個人電腦的輸入輸出界面，直接接收測到的溫度值，並計算，加快了測定結果的獲得。

2. 臺農67號稻穀的熱傳導係數 (K) 是隨着溫度 (t)，含水率 (M) 的升高而增加。在 4°C 至 40°C，含水率 12.2% (濕基) 至 27.5% (濕基) 的範圍下，熱傳導係數的變化從 0.0858 W/m°C 到 0.1343 W/m°C，標準差在 0.0059 W/m°C 以內。其關係式是：

$$K = 0.0597 + 0.00225M + 0.00028t$$

與國外已測得的稻穀熱傳導係數比較，極為接近。

3. PW 種洋葱密度 980kg/m³，含水率 92.2% (濕基)，在室溫時熱傳導係數為 0.455 W/m°C，

標準差為 0.029 W/m°C。

4. 初秋種甘藍，含水率 94% (濕基)，在室溫時的熱傳導係數隨密度的大小而變動，密度大時的均質性較好，個體間和個體內部差異小，所測得熱傳導係數變化較小。而在密度小時均質性較差，所測得熱傳導係數變化大。其結果為：當密度為 650kg/m³ 以上時，熱傳導係數為 0.365W/m°C，標準差為 0.022W/m°C。當密度為 570kg/m³ 到 590kg/m³ 時，熱傳導係數為 0.278 W/m°C，標準差為 0.044 W/m°C。

5. 板田種胡蘿蔔，密度約 1007kg/m³，含水率 90% (濕基)，在室溫時熱傳導係數為 0.546 W/m°C，標準差為 0.055 W/m°C。

參 考 文 獻

1. 萬一怒，中華民國 73 年 6 月。熱傳導係數測定器之研製及應用於農產品之測定，國立臺灣大學農業工程研究所機械組碩士論文。
2. ASHRAE, Handbook and Product Directory, Fundamentals. 1981. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
3. Bilanski. N.Y. And D.R. Fisher. 1976. Thermal conductivity of Rapessed. Trans. of the ASAE. 19(4): 788-791.
4. Choi Yonghee, M.R. Okos. 1983. The thermal properties of Tomato juice concentrates. Trans. of the ASAE. 26(1): 305-311.
5. Holman J.P. 1963. Heat Transfer. McGraw Hill Book Co. Ltd., New York.
6. Hooper J.C. and F.R. Lepper. 1950. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. ASHVE Trans. 50:309.
7. Hooper F.C. and S.C. Chang. 1953. Development of the conductivity probe. ASHVE Trans. 59:463.
8. Kazarian E.A. and C.W. Hall. 1966. Thermal properties of grain. Trans. of the ASAE. 18(1); 33-37,48.
9. Rao M.A., J. Barnard, J.F. Kenny. 1975. Thermal conductivity and thermal diffusivity of process variety squash and white potatoes. Trans. of the ASAE. 18(6): 1188-1192.
10. Reidy G.A. and A.L. Rippen. 1971. Methods

- for determining thermal conductivity in foods. Trans. of the ASAE. 14(2): 248-254.
11. Sharm D.K. and T.L. Thompson. 1973. Specific heat and thermal conductivity of Sorghum. Trans. of the ASAE. 16(1): 114-117.
12. Shaw J.T. 1977. Spontaneous heating of stored rapessed. Ph. D. thesis. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
13. Suministrado D.C. and V.K. Jindal. 1981. Some physical and thermal properties of rough rice. Published by the Southeast Asia Cooperative Post-harvest Research and Development. Programme, SEARCA, COLLEGE, LAGUNA, PHILLIPPINES, 3720.
14. Suter D.A., K.K. Agrawal and B.L. Claty. 1975. Thermal properties of peanut pod, hulls and kernels. Trans. of the ASAE. 18(2): 370-375.
15. Sweat W.E. and C.G. Haugh. 1974. A thermal conductivity probe for small food samples. Trans. of the ASAE. 17(1): 56-58.
16. Wratten F.T., W.D. Pool, J.L. Chesness, S. Bal and V. Ramarao. 1969. Physical and thermal properties of rough rice. Trans. of the ASAE 12(6): 801-803.

專營土木、水利、建築等工程

大協進營造廠股份有限公司

地址：羅東鎮興東路 180 號

電話：(039) 548335

專營土木、水利、建築等工程

家振營造有限公司

地址：宜蘭縣五結鄉福興村中福巷15號

電話：(039) 548488

專營土木、水利、噴漿等工程

義嵐營造有限公司

地址：宜蘭市新民路62號

電話：(039) 323538

專營土木、水利、建築等工程

家慶營造有限公司

地址：宜蘭市神農路39巷9號

電話：(039) 540532