

專論

果蔬熱傳導係數之測定

Determination of Thermal Conductivity of Fruits and Vegetables

國立臺灣大學農機系教授

陳 貽 倫

Yi-Luen Chen

摘 要

本文探討果蔬農產品熱傳導係數測定之原理與方法。使用非穩態熱傳之斜率法測定五種省產蔬菜之熱學性質。此法經證實為方便可行，惟受測果蔬需為能製成圓柱體者。在測定過程中，曾應用電腦輔助之疊代法計算。

ABSTRACT

A brief review was made on the heat transfer theory and various methods for determining thermal conductivity of different farm produces. And, a transient method—the slop method—was used to determine thermal properties of some local-grown vegetables. The method was proved to be both practical and convenient to use for those produces of which small cylinders can be made. A computer-aided iteration calculation was also applied in the determination process.

一、前 言

在農產品加工處理過程中，產品熱性質之知識甚為重要。諸如：冷卻、冷藏、凍結、殺青、通風、乾燥等，作業均涉及熱量在產品內之傳遞、溫度在產品內之分佈。惟農產品之熱性質不易求得，即使有數據可查，也常彼此有差異，此差異可能由於：(1)測量之誤差；(2)測量時使用不同之儀器；(3)測定時產品之溫度、壓力、含水率、組織成分等條件之不同；(4)產品本身非屬均質等因素所造成。農產品即使屬同一品種，也常因栽培、氣候環境、土壤、收穫時之成熟度、收穫後之處理之不同而具不同之物性。同一樣品，其熱傳速度也因其組織條理之方向而不同。所以，果蔬熱傳性質之測定是項艱難的工作，截目前止，農產品之熱傳性質資料並不多，國內研究工作尤其短缺。本文目的為綜合探討各

種現行測定農產品熱傳導係數原理和方法，並以其簡便可行之非穩態斜率法嘗試測定數種常用果蔬之熱學性質。附錄一為所收集一些果蔬之熱傳導係數資料。

熱在物體間傳遞之模式有三，即：傳導、對流和輻射。熱在固態農產品內部之傳遞主要是藉傳導方式，其傳導之速率(Q)與傳導面積(A)成正比，與內部溫度梯度 $(\frac{\partial T}{\partial x})$ 成正比，此即有名之福立爾律(Fouriers Law)：

$$Q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots(1)$$

式中k即為熱傳導係數。若熱在物體中傳導是多方向者，則其瞬時之熱量平衡公式如(2)式：

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \theta} \dots\dots\dots(2)$$

式中 T：溫度。

q̇：內部發生之熱，如呼吸熱。

α：熱擴散係數， $\alpha = k/\rho c$ ，ρ 為產品之密度、c 為其比熱。

θ：時間。

若熱傳為單向且內部無熱量發生，則上式簡化為：

$$\frac{1}{r^{1-2\nu}} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \theta} \dots\dots(3)$$

ν = 1/2 [平板]

ν = -1/2 [球體]

ν = 0 [長圓柱體]

設周邊條件為： $\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_0 = 0$ ，

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_l = h(T - T_*)$$

初始條件為：T = T₁，則(3)式之一般解為：

$$T_x = \frac{t_x - t_*}{t_1 - t_*} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n(x) \cdot e^{-(\lambda_n^n) \alpha \theta / \ell^2} \dots(4)$$

式中 λ_n 為下列各式中之第 n 次根

$$B_1 = \lambda_n \tan \lambda_n \text{ [平板]} \dots\dots(5)$$

$$B_1 = 1 - \lambda_n \cot \lambda_n \text{ [球體]} \dots\dots(6)$$

$$B_1 = \lambda_n J_1(\lambda_n) / (J_0(\lambda_n)) \text{ [長圓柱體]} \dots\dots(7)$$

(4)、(5)、(6)、(7)式中

T_x = 物品某部位之溫度比，為時間之函數。

t_x = 物品某部位之溫度，為時間之函數。

t_{*} = 物品周遭之溫度 (恆溫)。

t₁ = 物品之初溫。

C_n(x) 為 λ_n、物品形狀、及測點部位之函數與時間或溫度無關。

α = 熱擴散係數。

θ = 時間。

ℓ = 物品之特徵長度 (如：球體、圓柱體之半徑、平板厚之半)。

Bi = Biot 數，hℓ/k

J₁(λ_n) = 一次貝索 (Bessel) 函數

J₀(λ_n) = 零次貝索函數

如 F₀ = αθ/ℓ² > 0.2，則上式可簡化為：

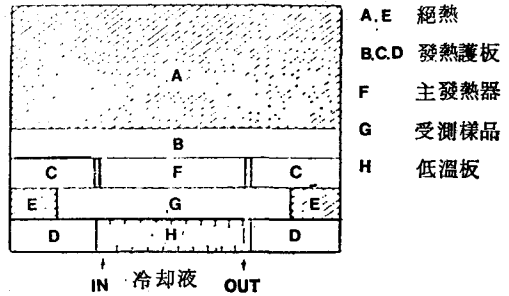
$$T_x = C_1(x) e^{-(\lambda_1^2) \alpha \theta / \ell^2} \text{ 或}$$

$$\ln T_x = -(\lambda_1/\ell)^2 \alpha \theta + \ln C_1(x) \dots\dots(8)$$

二、熱傳導係數測定方法

以上述熱傳理論為基礎，果蔬、農產品熱傳導係數測定之方法，可分為兩大類：(1)穩態法 (Steady state methods)；和(2)非穩態法 (Transient methods)。在第一類中有列方法：

1. 平行板法 圖一為平行板法示意圖⁽⁶⁾。發熱護板是為防止主發熱器側向熱之漏失。此法適用於無內熱產生之低傳導度均質乾固體。若測得主發熱傳出之熱量 Q 及受測樣品裏外兩側之溫度及傳熱面積，即可據下式算出其傳導係數⁽⁶⁾



圖一、平板法示意圖

$$K = Qd/2A\Delta t \dots\dots(9)$$

式中 K = 樣品之熱傳導係數。

Q = 傳導之熱量。

d = 受測樣品之厚度。

A = 受測樣品之傳熱面積。

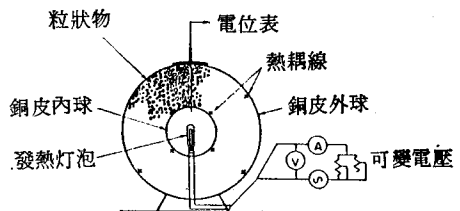
Δt = 受測樣品之兩面之溫差。

此法簡易，多被採用。

2. 同心圓筒法⁽⁶⁾⁽⁸⁾適用於粒狀物，如穀物種子等設同心圓筒之內外徑分別為 r₁、r₂，內外側溫度分別為 t₁、t₂ 時，其熱傳導係數可由下式算得：

$$K = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{2\pi(t_1 - t_2)} \dots\dots(10)$$

3. 同心球法(圖二) 此法與同心圓筒法原理一樣，其優於前者為其幾無熱之漏失。其缺點為受測



圖二、同心圓球法測定農產品熱傳導係數裝置

農產品難形成空心球體。同時，為使發熱體置於球心，受測產品必須切分割成兩半而導致熱傳之誤差⁽⁶⁾。

總之，穩態法適用於液態樣品；脫水之粉狀、粒狀、塊狀物，不適用於含水率在10%以上之半固體；需時較長；儀器與受測物之接觸面熱導抗阻無法估計；熱之漏失也無法準確估計。

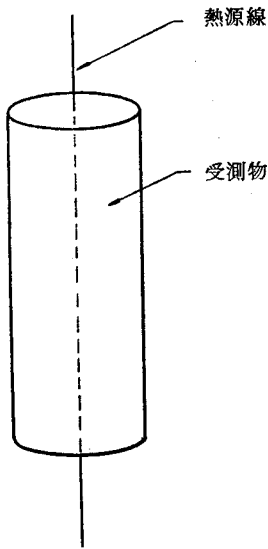
非穩態法之主要優點為：(1)測定過程快速；(2)有時可不必測定Q值；(3)有小額溫差即可。此三點對K值測定之準確性非常重要。以下為非穩態測法之數例：

1.熱線法 (Line heat source method)^{(6),(8)}

以具有穩定熱量輸出之長線（如電阻線）為熱源，此熱源線居圓筒形受測物之中心位置，如圖三。在不同時間測得樣品物某定點之溫度變化，即可由下式算得K值：

$$K = \frac{Q}{4\pi\Delta t} \cdot \log \frac{\theta_2}{\theta_1} \dots\dots\dots(11)$$

式中：Q：由熱源線傳入之熱量。
 Δt ：在時差 $(\theta_2 - \theta_1)$ 內之溫差。

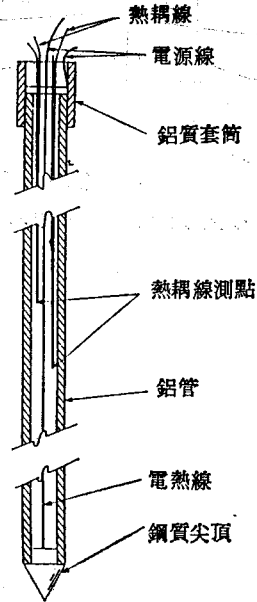


圖三、熱線法示意圖

此法自1888年沿用至今，特別適用於散裝粒狀物值之測定，也適用於液態物。其優點為：熱之漏失少。萬、蕭（1984應用此法測定稻穀、洋葱、胡蘿蔔、甘藍等農產品K值之測定。⁽²⁾

2.熱傳導測針法^(6,9) (Thermal conductivity probe method)

以三分徑、一尺半之鋁管製成之測針如圖四。使用時將測針插針測物。其構造原理乃上述熱線法之延伸。

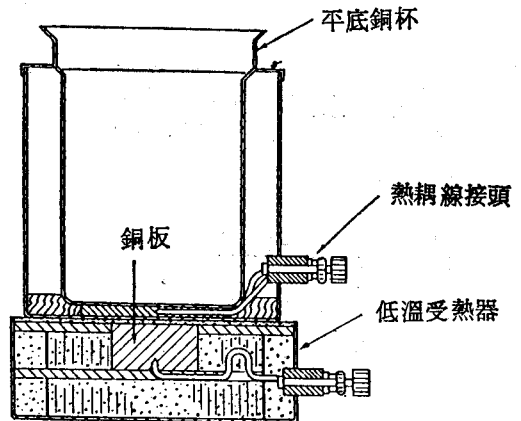


圖四、熱傳導測針之構造

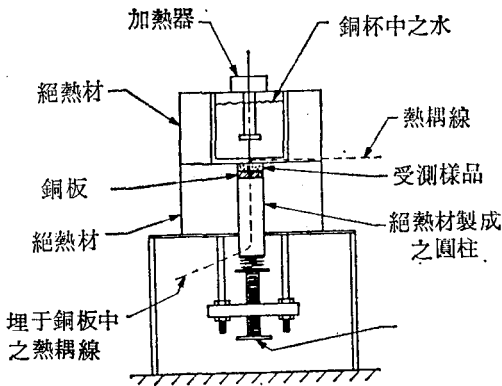
3.斐啓氏法 (Fitch method)⁽⁶⁾

圖五、六分別為斐啓氏和改良式斐啓氏熱傳導係數之測定裝置。此法將受測樣品夾置於一銅板和一平底銅杯之間。銅杯盛裝恒溫液體，作為熱源。其下之銅板作為低溫受熱器。受測樣品上下兩側裝熱耦線，測其溫差。

此法已為美國國家標準局列為標準測定裝置，



圖五、斐啓氏熱傳導係數測定裝置



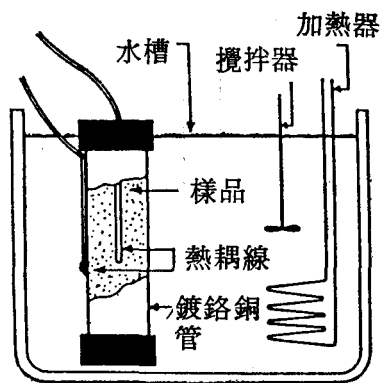
圖六、改良式斐啓氏熱傳導係數測定裝置

但為研究者多所詬病，因：(1)施壓力於樣品會導致變形，從而改變其物理性質；(2)會有多向熱傳；(3)有熱之漏失。

非穩態測定常用下述方法求熱傳導係數：將不同幾何形狀之產品置於不同之加熱或冷卻周邊環境中，在不同時間測定產品某特定部位之溫度變化，獲一溫度/時間曲線。如溫度座標為自然對數值，則此曲線將成直線，其斜度乃產品熱擴散係數之函數。若產品之密度、比熱、及傳熱時之周邊條件已知，K值可得。此法為多數學者應用，其困難之處為周邊條件斷定——如將產品置於水中加熱或冷卻時，水之溫度易測，但產品之表面溫度難定。以下為此法之數例：

4. 狄更生法 (Dickerson method):^(4,6,8)

狄更生氏 (1965) 將受測物裝實在一圓筒形之導體內 (圖七)，兩端以 P U 材料絕熱，放入一加熱水槽內。水槽不斷加熱使圓筒外壳及圓筒中心之溫度達相同之上升速率。在此條件下，受測物之熱擴散係數為 α ，



圖七、狄更生氏熱傳導係數測定裝置

$$\alpha = \frac{AR^2}{4(t_s - t_c)} \dots \dots \dots$$

式中 A = 溫度上升速率。

R = 圓筒半徑。

t_s = 圓筒外表溫度。

t_c = 受測物中心溫度。

此法之缺點為：如要達到一定速率之溫度上升狀況，需時甚久，不能稱為快捷之方法。

狄更生法所用水槽之溫度不斷上升，但多數學者皆使用恒溫槽，使周邊條件簡化，便於解析計算。以下諸法皆採恒溫媒體。

5. 數值法 (Numerical method)^(1,4,8)

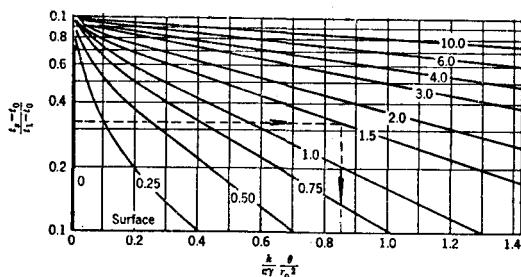
將初溫均一、形狀規則之受測樣品投入一恒溫槽中，測定其某處鄰位之溫度/時間曲線。再在已知 h 、 c 、 ρ 之條件下，以不同之假設 k 值，用電腦模擬數值法繪得該受測樣品同部位之另一組溫度/時間曲線，用最小二乘方技術比較兩組曲線，相差最小時之 k 值即為所求。陳氏 (1984) 曾用此法估算省產荔枝果實之熱傳導係數。⁽¹⁾

應用此法或其他類似方法需有下列諸項假設：

- ① 受測物品需是均質。
- ② 受測物品之形狀需成規則。
- ③ 受測物品之初溫需均一。
- ④ 周遭環境需是恒溫。
- ⑤ 受測物周邊之對熱傳係數需一定。
- ⑥ 受測物之熱性質不因溫度和時間而改變。

6. 圖解法⁽⁴⁾：

此法之實驗手續與數值法類同，即將一初溫均一的形狀規則之受測樣品投入一恒溫槽中，經過一定時間之後測得其某一部位之品溫，算得其溫度比 $(t_1 - t_\infty)/(t_i - t_\infty)$ ，再假設一近似 k 值，代入 $B_1 = h\ell/k$ ，得 B_1 值，以上述之溫度比和 B_1 值在熱傳導圖 (圖八) 取得 Furrier 值 (F_0)，由 F_0



圖八 以熱傳導圖求 k

值算出k值。此算得之k值較前假定之k值必定接近真實值甚多。然後，再以此較準確之k值代入 $B_1 = h\ell/k$ 式中，重覆上項步驟，求得更準確之k值。

7. 斜率法 (slop method)^(4,8)

由(8)式可知：在相當長時間 ($F_0 > 0.2$) 後，具規則形狀物品在加熱或冷卻時，其溫度/時間曲線是成對數關係。如表示在半對數座標圖上時，溫度與時間將成直線關係，而其斜率為 $(\lambda_1/\ell)^2 \alpha$ 。其中 λ_1 單是 B_1 之函數，其關係式如(7)式，故其斜率與受測物品之部位無關，也即該物品各部位之溫度/時間關係直線之斜率均相等。因此，只要測定規則形狀物品內任一部位之溫度/時間變化，即可獲得所要數據。該部位之準確部位毋需知道。此外，實驗結果之一連串溫度/時間數據均可利用，據以計算其斜率值，從而求得所要之 α 、k 值。

例如，在時間 θ_1 之瞬時，受測物品任一部位之溫度經測量為 t_1 ；在時間 θ_2 之瞬時，該部位之溫度為 t_2 ；受測物品之初溫為 t_* ；冷卻媒體恒溫為 t_∞ ，則在溫度/時間之半對數座標圖上，此二點聯線之斜率為m，

$$m = \frac{\log\left[\frac{t_1 - t_\infty}{t_1 - t_*}\right] - \log\left[\frac{t_2 - t_\infty}{t_2 - t_*}\right]}{\theta_1 - \theta_2} \dots\dots\dots(13)$$

由(8)、(13)合併得：

$$\alpha = -m(\ell/\lambda_1)^2 \dots\dots\dots(14)$$

因此，經由實驗取得m值，同時設法計算 λ_1 值，則 α 值可求得。但如前述， λ_1 單是 B_1 之函數，即是 h 、 k 、 ℓ 之函數 (公式(5)、(6)、(7))，故如 k 、 h 未確定， λ_1 值便難計算。今有一簡便之法，可越過周邊條件之障礙，即：如果，受測物在冷卻或加熱媒體中，使媒體受充分攪動，因而使 B_1 值變得很大， λ_1 值將趨近一常數。例如，在球體、長圓柱體、平板之場合，如 B_1 趨近 ∞ ， λ_1 值分別為 π 、 2.4048 和 $\pi/2$ 。如 $B_1 \geq 200$ ，則其對應之 λ_1 值與上述常數相差在 0.5% 以下。⁽⁴⁾

使冰水強迫循環、充分用空氣攪動冰水、劇烈攪動乙二醇和水，其與在內之受測物間之對流熱傳係數分別達、568、682、1582 $W/m^2-^\circ C$ 。若受測物在流動之水管中，則其 h 值可達 3124~3976 $W/m^2-^\circ C$ 。⁽⁴⁾

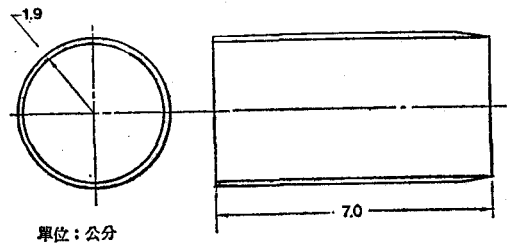
另一使周邊條件簡化之法為：用以導熱良好之薄金屬圓筒緊套在受測樣品之外。如金屬筒與受測物接觸良好，則金屬表面之溫度即為受測物外表之溫度。

但是，如果 B_1 值低於 10~20，而 h 值已知，則可先假設一相當之 k 值，而後依次算得 B_1 、 λ_1 、 $(1/\lambda_1)^2$ ，以後者連同實驗求得之 m 值代入(14)式，得一 α 及 k 值之新值，而此一新 k 值必定更接近 k 之真實值。如此，可用疊代 (Iteration) 法算得其 k 之近似值。電腦計算程式如附錄二。

三、非穩態斜率法之應用

1. 材料與方法

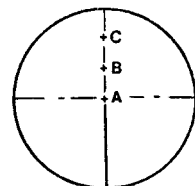
當日選購之新鮮果蔬置於實驗室內，使其溫度回溫至室溫。受測試之果蔬均製成直徑 3.8 公分，高 7.0 公分之實心圓柱體，圖九所示為製作果蔬圓柱體之金屬管狀工具。



圖九 製作果蔬圓柱體之金屬管工具

用精密天平稱果蔬圓柱體之重量，除以體積，得其密度，再將相當重量之果蔬用打碎機攪碎，放入 70°C 恒溫烤箱 30 小時，烤乾水分後稱重，得其含水率。

以熱耦測針插入果蔬圓柱，分別置於 A、B、C 三處，如圖十。A 在中心，B 在表面下 1.2 公分，C 在表面下 0.6 公分。圓柱體兩端以絕熱材粘貼，以防側向傳熱，以模擬無限長圓柱體。裝置妥善後，投入用空氣攪動之冰水槽中，以溫度自動紀錄器 (Auto Logger) 每隔一定時間紀錄其溫度變



圖十、測溫點位置

化。冰水槽為臺大農機系自行設計。其壓縮機具一馬力。冷排管在冰水槽之下，具蓄冰功能。另有小型空氣幫浦在冷排管之下。試驗時，攪動冰水，使冰水溫度均勻，並增強熱傳效果。冰水溫度可維持0~1°C。

果蔬之比熱用 Siebel's Equation⁽⁶⁾計算：

$$C = 0.008M + 0.20 \dots\dots\dots(15)$$

式中 M=果蔬之濕基含水百分數。

將上述果蔬圓柱體投入攪動之冰水，其表面之對流熱傳係數 h 之確定乃經由下述方法：

由公式(14)知，果蔬之熱傳導係數 k，

$$k = \alpha \rho c = -m(\ell / \lambda_1)^2 \rho c \dots\dots\dots(15)$$

式中 α = 熱擴散係數。

ρ = 果蔬密度。

c = 果蔬比熱。

m = 果蔬冷却曲線在半對數圖上之斜率實驗值。

ℓ = 圓柱體半徑。

λ_1 : (7)式之第一根。

由於 λ_1 是超越函數(7)式之根，故是 B_1 之函數。表一為(7)式中 B_1 和 λ_1 之對應值。Luihov 導出二者關係之經驗式：⁽⁵⁾

表一、(7)式中 B_1 和 λ_1 之對應值

B_1	λ_1	B_1	λ_1
0.00	0.0000	2.00	1.5994
0.02	0.1995	3.00	1.7887
0.04	0.2814	4.00	1.9081
0.06	0.3438	5.00	1.9898
0.08	0.3960	6.00	2.0490
0.10	0.4417	7.00	2.0937
0.20	0.6170	8.00	2.1286
0.30	0.7465	9.00	2.1566
0.40	0.8516	10.00	2.1795
0.50	0.9408	15.00	2.2509
0.60	1.0184	20.00	2.2880
0.70	1.0873	30.00	2.3261
0.80	1.1490	40.00	2.3455
0.90	1.2048	50.00	2.3572
1.00	1.2558	100.00	2.3809

$$(\lambda_1)^2 = \frac{(\lambda_1)_\infty^2}{1 + I/B_1^3} \dots\dots\dots(16)$$

式中 $(\lambda_1)_\infty$ = 當 $B_1 \rightarrow \infty$ 時，(7)式之第一根。對無限圓柱體而言， $(\lambda_1)_\infty = 2.4048$

I = 2.45，無限圓柱體。

S = 1.04，無限圓柱體。

由(15)、(16)二式可知 k 乃 B_1 之函數，而 $B_1 = h\ell/k$ 。所以，如果 k 為已知，即可由實驗求得 m 值，再由疊代法求得 h。作法是：將一已知其熱傳導係數、初溫均一之長圓柱體樣品投入恒溫槽中；測得其(溫度/時間)關係曲線，算得其斜率 m。其次，假設一較真實值為低(或高)之 h 值，由 h 值依次推算 B_1 、 λ_1 及 k 值。若此推算之 k 值不等於已知之熱傳導係數值，則略增(減) h 值，重複計算，直至推算之 k 值接近真實值為止，此時之 h 值即為所求。上述疊代法計算之電腦程式如附錄三。本文以文獻所載紅蘿蔔之熱傳導係數 0.001446 cal/sec-cm-°C 為已知，依法求得 $h = 0.0047$ cal/sec-cm²-°C。測定各種蔬菜之熱傳導係數時，便以此 h 值為計算基礎。

既知 h 值，則測其他果蔬之產品熱傳導係數之步驟如以上斜率法所述。所製成之圓柱體樣品是同樣大小形狀，測試裝置與方法需與測 h 值者一致。

2. 結果

A. 密度、含水率、比熱

五種果蔬之密度、含水率，和比熱之測定及計算如下表二：

表二、五種蔬菜之密度、含水率、及比熱

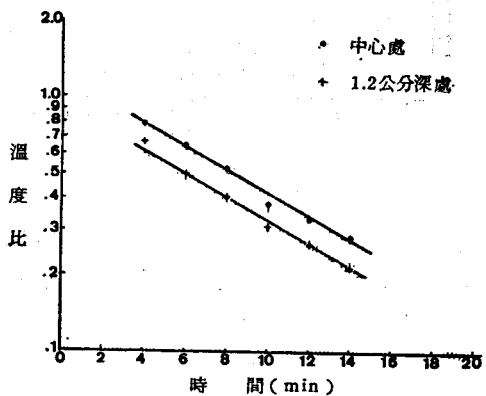
果 蔬 名	白蘿蔔	馬鈴薯	扁蒲	紅蘿蔔	竹筍
密度 g/cm ³	0.973	1.010	0.794	0.993	0.960
含水率 w.b.%	94.7	85.6	92.8	89.9	93.0
比熱 cal/g-°C	.958	.885	.942	.919	.944

B. 對流熱傳係數

表三所示為紅蘿蔔圓柱體樣品冷却時之溫度變化。兩處測溫部位之溫度變化若表示於半對數表上，則如圖十一。每一測溫部位在任何二瞬時所測之溫度皆可據以計算其斜率 m，惟為簡約計算，只選四個時段，求其平均，結果如表四。以 m 值及文獻所載(附錄一) k 值代入(15)式，用疊代法計算得此

表三、紅蘿蔔圓柱體樣品冷却時之溫度變化

時間	中心處		離表面1.2公分深處		試驗條件
	溫度°C	溫度比 $(t-t_∞)/(t_1-t_∞)$	溫度°C	溫度比 $(t-t_∞)/(t_1-t_∞)$	
0	21.5		22		圓柱半徑=1.9 cm 圓柱高=6.9 cm 密度=0.94 g/cm ³ 含水率= 初溫 t ₁ =22°C 冰水溫 t _∞ =1°C
1	21.5		20.5		
2	19.5		18		
3	18.5		16.5		
4	17.5	.786	15	.667	
5	16		13		
6	14.5	.643	11.5	.500	
7	13		10.5		
8	12	.524	9.5	.405	
9	11		8.5		
10	9	.381	7.5	.310	
11	8		7		
12	8	.333	6.5	.262	
13	7		6		
14	7	.286	5.5	.241	
15	6.5		5.5		
16	6		4		
17	4.5		4		
18	4.5		3.5		
19	4		3.5		
20	4		3		
21	4		3		
22	3		2.5		
23	3		2.5		
24	2		2		
25	2.5		2		



圖十一、紅蘿蔔圓柱體冷却曲線

表四、紅蘿蔔冷却曲線之斜率平均值

時間 (min)		斜率 $m \times 10^{-3}$	
t ₁	t ₂	圓柱中心	1.2公分深處
2	8	1.69	2.08
2	10	2.01	2.13
2	12	1.79	1.95
2	14	1.69	1.70
平均		1.88	

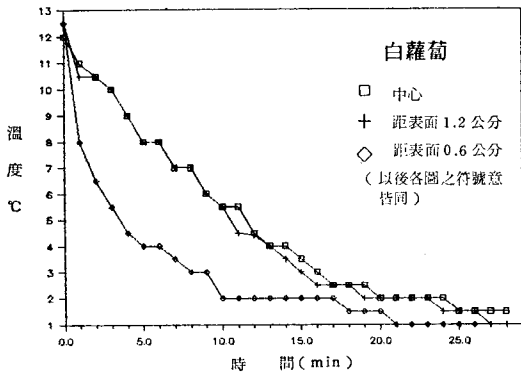
圓柱體在本冰水裝置冷却時之對流熱傳係數 $h = 0.0047 \text{ cal/sec-cm}^2\text{-}^\circ\text{C}$ 。

C. 熱傳導係數

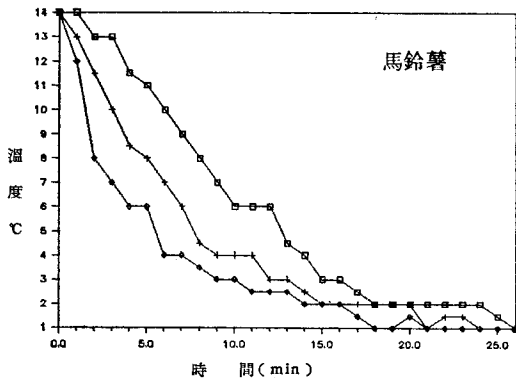
圖十二至十六各為 5 種受測果蔬之冷却曲線，根據此等(溫度/時間)關係曲線，每種蔬菜以其製成之圓柱體之中心點溫度變化為準，其半對數上之斜率 m 以(13)式計算，式內 θ_1 、 θ_2 分別以 5分/10分；5分/15分；及 10分/15分等三組數代入；其表面部分之對流熱傳導係數定為 $0.0047 \text{ cal/sec-cm}^2\text{-}^\circ\text{C}$ 。用疊代法計算得五種蔬菜之熱傳導係數如表五。

3. 討論

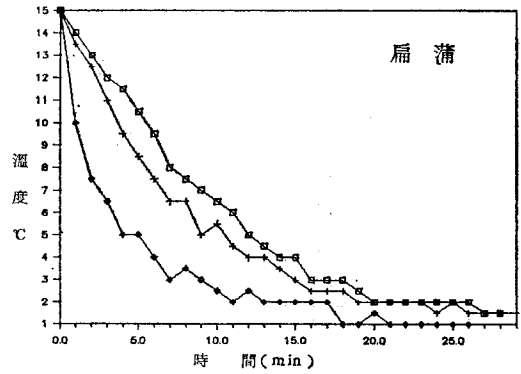
半徑為 1.9 公分之圓柱體在本文所述裝置內冷却時，間接測得圓柱體表面之對流熱傳係數為 $0.0047 \text{ cal/sec-cm}^2\text{-}^\circ\text{C}$ ，較文獻所載他人類似裝置所測結果為低，可能由於空氣攪動之程度不夠。冰水機冷排管大塊結冰，擋住空氣泡通過可能也是原因。當 h 值小時， B_1 值隨着變小；若 $B_1 < 10$ ，則 h 值之變動，在計算時影響 k 值之幅度增大。



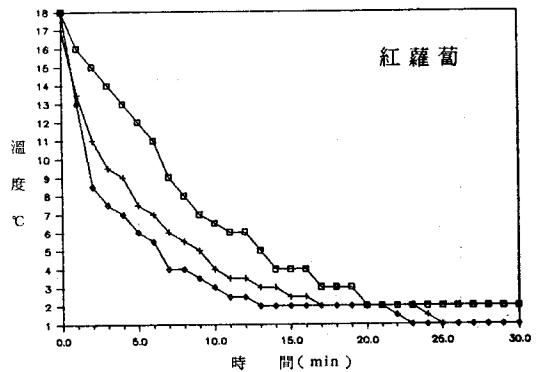
圖十二、白蘿蔔之冷却曲線



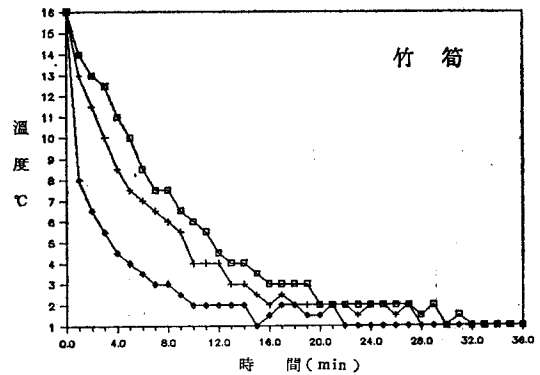
圖十三、馬鈴薯之冷却曲線



圖十四、扁蒲之冷却曲線



圖十五、紅蘿蔔之冷却曲線



圖十六、竹筍之冷却曲線

所測得紅蘿蔔之熱傳係數為 $0.00151 \text{ cal/sec-cm}^2\text{-}^\circ\text{C}$ ($0.632 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$)，與已知文獻所載(附錄一)者相當一致。紅、白蘿蔔和馬鈴薯在三種不同時段所測得之熱傳導係數頗有差異；而扁蒲、竹筍之數據則頗一致，其原因需再探究。

本文實驗未盡完善之處至少有三：一為溫度紀錄之最小讀數為 1°C ，過於粗略；另一為熱耦線未

附錄一：果 蔬 熱 傳 導 係 數 ^{3,6}

產 品 名 稱	含 水 率 % w.b.	溫 度 °C	密 度 g/cc	熱 傳 導 係 數 W/m ² -°C	Btu/ft-hr-°F	資 料 來 源 *
Apple, green	88.5	28	0.79	0.422	0.278	
Apple, red	84.9	28	0.84	0.513	0.296	
Apple		8		0.418		
Apple					0.20	ASHRAE H. B., 1977 Bennett et Al, 1969
Avocado	64.7	28	1.06	0.429	0.248	
Banana	75.7	27	0.98	0.481	0.278	
Beet, red	89.5	28	1.53	0.601	0.347	
Black Currants		-17		0.310		ASHRAE H. B., 1977
Broccoli		-6		0.385		ASHRAE H. B., 1977
Cantaloupe	92.8	28	0.93	0.571		
Carrot	90.0	28	1.04	0.605	0.349	
Carrot (sliced & scalded)		-16		0.669		ASHRAE H. B., 1977
Cherry tomato (core)	92.3	28	1.01	0.462	0.330	
Cherry tomato (side)	92.3	28	1.01	0.527	0.305	
Cucumber	95.4	28	0.95	0.598	0.346	
Goose berry		-15		0.276		ASHRAE H. B., 1977
Grapefruit (peeled)	90.4	26	0.95	0.549	0.317	
Grapefruit, Juice Vesicle		30		0.464		ASHRAE H. B., 1977
Grapefruit Rind		30		0.237		"
Grapefruit, Whole		25		0.326		"
Lemon		25		0.439		"
Lemon, peeled	91.8	28	0.93	0.525	0.303	
Lime, peeled	89.9	28	1.00	0.490	0.283	
Nectarine	89.8	28	0.99	0.585	0.338	
Onion	87.3	28	0.97	0.574	0.332	
Orange, peeled	85.9	28	1.03	0.580		
Orange Juice Vesicle		30		0.435		ASHRAE H. B., 1977
Orange Rind		30		0.179		"
Orange, whole		25		0.410~0.490		"
Peach	88.5	28	1.00	0.595	0.344	
Pineapple	84.9	27	1.01	0.549	0.317	
Plum, blue	88.6	26	1.13	0.551	0.318	
Plum		-16		0.247		ASHRAE H. B., 1977
Potato, Mashed		-13		1.09		"
Potato Salad		2		0.479		"
Squash					0.29	Gane, 1937
Straw-berry	88.8	28	0.90	0.462	0.267	
Straw-berry		-14		1.10		ASHRAE H. B., 1977
Straw-berry		-15		0.96		"
Sweat Corn					0.113	Smith et al, 1971
Turnip	89.8	24	1.00	0.563	0.325	
Water	100.0	28		0.611	0.356	

* 無註明來源者均錄自 Vincent E. Sweat 報告。⁽⁶⁾

予妥善絕熱；三為重複試驗太少，因此，所得數據僅能稱為初測結果，期日後改進。惟本文所用非穩態斜率法測定規則形狀果蔬農產品之理論相當引人，測試手續相當簡便、需時相當短暫，應屬可取之方法。

四、致 謝

本文承臺大農機系蕭介宗博士提供文獻資料、同仁李允中博士檢校文中所引用之熱傳理論公式及惠賜寶貴意見、楊國寶同學辛勤之實驗室測試工作，在此一併申謝。

表五、以非穩態斜率法初測五種蔬菜之熱傳導係數* (cal/sec-cm-°C)

測 溫 時 間 (min)		白 蘿 蔔	馬 鈴 薯	扁 蒲	紅 蘿 蔔	竹 筍
θ_1	θ_2					
5	10	0.00089	0.00158	0.00092	0.00177	0.00127
5	15	0.00100	0.00171	0.00092	0.00150	0.00132
10	15	0.00112	0.00192	0.00093	0.00127	0.00137
平 均		0.00100	0.00171	0.00092	0.00151	0.00132

* $1 \text{ w/m}^2\text{-}^\circ\text{C} = 2.39 \times 10^{-3} \text{ cal/sec-cm-}^\circ\text{C}$.

附錄二：疊代法求 k

```

10 READ T1, T2, T8, T1, TIME1, TIME2, H, L, ROL, SH
20 DATA 10.0, 6.0, 0.0, 16.0, 300, 600, 0.0047, 1.9, .960, .944
30 M=(LOG (T1-T8)/(T1-T8))-LOG ((T2-T8)/(T1-T8))/(TIME1-TIME2)
40 K=.0005
50 BI=H*L/K
60 C=1.04*LOG(BI)
70 B=EXP(C)
80 LAM=SQR (2.4048^2/(1+2.45/B))
85 KK=-M*L^2*(1/LAM^2)*ROL*SH
90 PRINT K, KK, BI, LAM
100 IF (KK-K)/KK<.005 THEN 200
110 K=K+.00001
120 GOTO 50
200 END

```

附錄三：疊代法求 h

```
10 M=.00188
20 L=1.9
30 ROL=.98
40 SH=.92
50 H=.004
60 K=.001446
70 BI=H*L/K
80 C=1.04*LOG(BI)
90 B=EXP(C)
100 LAM=SQR(2.4048^2/(1+2.45/B))
110 KK=M*L^2*(1/LAM^2)*ROL*SH
120 PRINT H, LAM, KK
130 IF ABS((KK-K)/K)<.005 THEN 200
140 H=H+.0001
150 GOTO 70
200 END
```

五、參 考 文 獻

1. 陳貽倫 1984 荔枝果實之預冷與有關物性
農工學報 V.30 No. 4, pp. 74~84。
2. 萬一怒、蕭介宗 1984 熱傳導係數測定器之
研製及應用於農產品之測定 農工學報 V. 30
No. 4, pp. 114~124。
3. ASHRAE 1977 *Fundamentals Handbook*,
Chapter 29.
4. Gaffney, J. J., C. B. Baird, and W. D.
Eshleman 1980. Review and Analysis of
the Transient Method for Determining
Thermal Difusivity of Fruits
and Vegetables. ASHRAE Trans.
Part 2, pp. 261-280.
5. Luikov, A. V., 1968. *Analytical Heat
Diffusion Theory*. Academic Press,
N.Y.
6. Mohsenin, N.N., 1980. *Thermal Proper-
ties of Foods and Agricultural Materials*,
Gordon & Breach Science Publishers,
N.Y.
7. Myers, G.E., 1971. *Analytical Methods
in Conduction Heat Transfer*, McGraw-
Hill, N.Y.
8. Reidt, G.A. and A. L. Rippen, 1971.
Methods for Determining Thermal
Conductivity in Foods. ASAE Trans.,
pp. 248-254.