

# 專 論

## 柱狀樣品果蔬之熱傳導係數測定

### Determination of Thermal Conductivity of Fruits and Vegetables in Cylindrical Samples

國立台灣大學農機系教授

國立台灣大學農機系研究生

陳 貽 倫

張 高 郎

Yi-luen Chen

Kao-lang Chang

#### 摘 要

根據一般熱傳遞理論及 Luikov 氏經驗公式，本文推導獲致一可以計算圓柱體樣品  $h$  值（對流熱傳係數）或  $k$  值（熱傳導係數）之公式。若  $h$  和  $k$  二者之一為已知值，且已經實驗測得樣品在溫度處理時之品溫變化曲線，則  $h$  和  $k$  二者之中之未知值可由此公式算出。

文中之管流裝置，用以加速和控制溫度處理媒體之流動，可提升  $h$  值，穩定周邊條件，使實驗所得之  $k$  值比較可靠。經此實驗所測得本省八種蔬菜之熱傳導係數為：

紅 蘿 蔔	0.607 w/m-°C	涼 薯	0.535 w/m-°C
白 蘿 蔔	0.540 w/m-°C	冬 瓜	0.505 w/m-°C
馬 鈴 薯	0.536 w/m-°C	扁 蒲	0.389 w/m-°C
胡 瓜	0.506 w/m-°C	竹 筍	0.523 w/m-°C

#### ABSTRACT

Based on general heat transfer theories and Luikov's empirical equation, an equation was developed to calculate either  $h$  (heat convection coefficient) or  $k$  (thermal conductivity) of a cylindrical sample being cooled/or heated in a cooling/or heating medium if one of the two parameters is known and the cooling/or heating rate has been measured.

A pipe-flow apparatus was designed to quicken the flow of cooling/or heating medium over the surface of the test sample to obtain higher and steadier  $h$  values, therefore, more reliable  $k$  values could be obtained through the experiment.

The thermal conductivity of eight local-grown vegetables were thus obtained as follows:

Carrot	0.607 w/m-°C
Chinese radish	0.540

Potato	0.536
Cucumber	0.506
Yam bean	0.535
Wax gourd (Tunka)	0.505
White-flowered gourd (Calabash)	0.389
Bamboo shoot	0.523

### 一、緒言與文獻調查

為農產品之保鮮、久貯不壞、品質提高、提高附加價值，其收穫後處理和加工技術日趨重要。農產品之冷熱處理為處理過程中最重要之一環，而常見之各種處理，如：冷卻、冷藏、凍結、殺青、蒸熱、消毒、通風、乾燥、無不與熱之傳遞有關。確知產品之熱傳性質能提升加工技術層次，掌握品質、節省人力、節省能源、便利機械與工程之設計。

早在1935年，Bakke & Stiles 將燕麥盛在二同心圓筒之間，圓筒之內實以冰塊，圓筒之外套以恆溫水槽，測量溶冰之量和紀錄時間便可算得燕麥之熱傳係數。1944年，Oxley 以二同心球代替圓筒，被測穀物裝在二球層之間，熱源置於球心，大球之外以風扇冷卻，達平衡時，計算其熱傳係數<sup>(8)</sup>。

Babbitt (1945) 應用線熱源法 (Line heat source) 以測定穀物之熱傳導係數<sup>(9)</sup>。小麥裝在直徑1呎，高2呎之圓筒內，一根電熱線貫穿圓筒中心，以下式計算其熱傳導係數：

$$\Delta t_r = \frac{I^2 R}{2\pi K} \ln a - \frac{I^2 R}{2\pi K} \ln r \quad (1)$$

式中  $\Delta t_r$ ：離中心軸  $r$  處與周邊之溫差

$a$ ：中心軸至周邊之半徑

$I$ ：電熱線上之電流

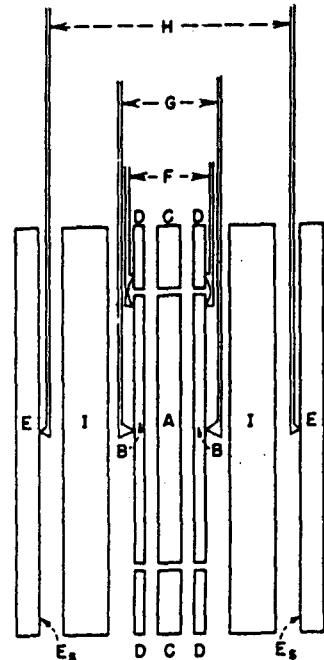
$R$ ：電熱線上之電阻

萬、蕭二氏於1984年應用上法製作測定器，測量稻穀、洋蔥、甘藍、胡蘿蔔之熱傳係數<sup>(4)</sup>。

Watts & Bilanski (1973) 以非穩態法來測定單粒黃豆之熱傳係數。將一熱耦線置一豆中之一小孔內，另一熱耦線緊貼豆外，先置豆於一恆溫之油槽，少時，再移置於另一較高溫之恆溫油槽，紀錄黃豆中心溫度之變化可以計算其熱傳係數<sup>(9)</sup>。

Gane (1937)<sup>(8)</sup> 將球形果實貯至 15°C，然後以冷風冷卻之，或置於快速攪動之高溫石臘溶液

中，在不同時間，測得果實中心之溫度。若假設  $K/h \cdot r \cong 0$  ( $K$  為果實之熱傳導係數， $h$  為果實外表與外界之對流熱傳係數， $r$  為果實半徑)，便可在 Gurney-Lurie Chart 上查得其熱擴散係數。如果再測果實之比重及比熱 (後者可以公式估算)，便可算得其熱傳導係數。陳於1984年即應用此法估算省產荔枝果實冷卻所需時間，並進一步假設荔枝果實為均質球體，用有限差分法，以不同之熱傳係數值代入數學模擬式，以電腦計算繪出其冷卻曲線與實驗所得之冷卻曲線比較，以決定其熱傳導係數究竟為若干<sup>(1)</sup>。



- |        |                     |
|--------|---------------------|
| A：熱源   | E <sub>s</sub> ：冷卻面 |
| B：高溫板  | F：溫差熱耦測針            |
| C：熱源護板 | G：高溫側熱耦測針           |
| D：高溫護板 | H：低溫側熱耦測針           |
| E：冷卻板  | I：受測樣品              |

圖一、穩態平板法裝置

穩態平板法<sup>(6)</sup> (圖一) 係將受測物切成片狀置於一不同溫度之平板間，並測其平板間之熱流量，受測物之熱傳導係數可由下式算出：

$$\text{式中 } K = Qd/2A\Delta t \quad (2)$$

Q = 熱流量  
d = 受測物厚度  
A = 受測物面積  
 $\Delta t$  = 平板溫差

此法理論簡易，適用於板狀之不良熱導體及乾凍食品，其測定細節可見於 ASTM 標準；其缺點為需時久。

Fitch Method<sup>(8)</sup> 為測量不良導體熱傳導係數之常用非穩態方法，載於美國標準局 No. 561 報告。其裝置包括一熱源容器、盛裝恆溫液體，一接受器以接受熱量。一薄層之受測樣品夾置於二者之間，紀錄時間和溫度數據，代入下式，即可求得 K 值：

$$k = 2.303 \frac{MCL}{A} \cdot \frac{\log(I_1/I_2)}{\theta} \quad (3)$$

式中 M：接受器之質量  
C：接受器之比熱  
I<sub>1</sub>：為第一時間之溫差  
I<sub>2</sub>：為第二時間之溫差  
 $\theta$ ：時間差  
A, L：分別為樣品之面積和厚度

1964年，Bennett 等以上法之改良型裝置測量柳橙、葡萄柚之果肉、果皮之熱傳導係數<sup>(9)</sup>。

Fitch 裝置已是美國國家標準測定裝置，其缺點為：1) 施壓可能導致樣品變形，從而改變其物理性質；2) 會有多向熱傳；3) 有熱的漏失。

有人以斜率法<sup>(6)</sup>測定具規則形狀物品之熱傳導係數，其理論為：當物品在受熱或冷卻時，在相當時間後 (即  $F_0 = \alpha\theta/\ell^2 > 0.2$ )，其任何部位之溫度與時間之關係為

$$\ln T_x = -\left(\lambda_1/\ell\right)^2 \alpha\theta + \ln C_1(x) \quad (4)$$

式中 T<sub>x</sub> = 物品某部位之溫度比  
 $\lambda_1$  = 超越函數之第一根，是 Bio 數之函數  
 $\ell$  = 規則形狀物品之代表長度  
 $\theta$  = 時間  
C<sub>1</sub>(x) = 為  $\lambda_1$ 、物品形狀、及測點部位之函數，與時間和溫度無關。

其溫度與時間成對數關係，如表示在半對數座標上，二者將成直線關係，而其斜率為  $(\lambda_1/\ell)^2 \alpha$ 。故其斜率與受測物品之部位無關。因此，只要測定任一部位之溫度/時間變化，即可獲得所要數值，該部位之準確部位毋需知道，省却許多測量上之困擾。此外，實驗結果之一連串溫度/時間數樣均可利用，據以計算其斜率，從而求得所要之  $\alpha$ 、K 值。

陳 (1989)<sup>(2)</sup> 應用此法測定白蘿蔔、馬鈴薯、扁蒲、紅蘿蔔、竹筍等蔬菜之熱性質，其測試手續簡便，需時不多。在其測定過程中，所用之對流熱傳係數 h 值是用間接法推算，其邊界條件不十分穩定，且推算所得之 h 值僅 0.0047 Cal/s-cm<sup>2</sup>-°C (197 w/m<sup>2</sup>-°C)，Bio 數在 5.9~9.7 之間，h 值若稍有變動，K 值將受到較大的影響。本研究之目的為提高 h 值，並使其邊界條件穩定下用斜率法測定省產果蔬之熱傳導係數，此等果蔬需能製成圓柱狀樣品者。

## 二、材料、方法與步驟

以金屬管工具將新鮮果蔬製成直徑 3.8 公分、高 7.0 公分之實心圓柱體 (圖一)，置於實驗室，使其品溫均勻，受測果蔬之比重和含水率測定方法如前文<sup>(2)</sup>。受測圓柱樣品兩端以同直徑之圓柱形絕緣材緊密夾貼，以防側向熱傳以模擬無限長圓柱體。絕緣材之外再以同直徑之塑膠管予以延伸，總長約 61 公分。用細長螺絲將此 61 公分長之圓管空懸於一直徑較大之另一塑膠圓管內，使二管截面形成同心圓，二管壁間可容冰水流通 (圖一、二)，冰水流通之裝置如圖三。實驗時，水流量  $Q = 8.34 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ，在二管壁間之環形通道處 (圖四) 之流速  $U = 0.92 \text{ m/s}$ ，冰水槽容積 75<sup>cm</sup> × 55<sup>cm</sup> × 89<sup>cm</sup>，冰水溫度可維持 1~2°C。

品溫用 Digstrip II 溫度紀錄器 (圖五)，其最小讀數為 0.1°C，每分鐘紀錄一次，測溫處有二，一在圓柱樣品之中心，另一在圓柱表面下約 1.2 公分處。

果蔬之比熱用 Siebel's eq. 計算

$$C = 0.08M + 0.20 \quad (5)$$

式中 M 為果蔬之濕基含水率百分數  
測定果蔬熱傳導係數之步驟如下·

1. 將一已知 K 值之圓柱樣品裝在套管內受測位

置，啓動水泵，測得該物品之溫度／時間變化關係，此關係在半對數座標上乃是直線，由下式計算此直線之斜率

$$m = - \frac{\ln \left[ \frac{t_1 - t_\infty}{t_1 - t_\infty} \right] - \ln \left[ \frac{t_2 - t_\infty}{t_1 - t_\infty} \right]}{\theta_1 - \theta_2} \quad (6)$$

式中  $t_1, t_2$  = 受測物某部位在二時間點 ( $\theta_1, \theta_2$ ) 之溫度

$t_1$  = 受測物某部位之初溫

$t_\infty$  = 冰水溫度

此斜度  $m$  即(4)式中等號右側第一項時間變數  $\theta$  之係數，故得

$$\alpha = -m (\theta / \lambda_1)^2 \quad (7)$$

又由 Luidov 經驗式<sup>(7)</sup>

$$(\lambda_1)^2 = \frac{(\lambda_1)^2}{1 + I / Bi^2} \quad (8)$$

當受測物爲無限長圓柱體時，上式中之

$$(\lambda_1)_\infty = 2.4$$

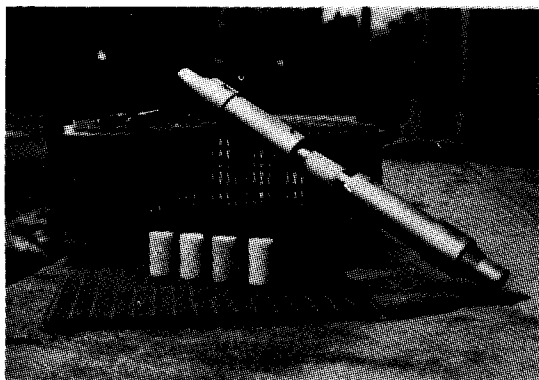
$$I = 2.45$$

$$s = 1.04$$

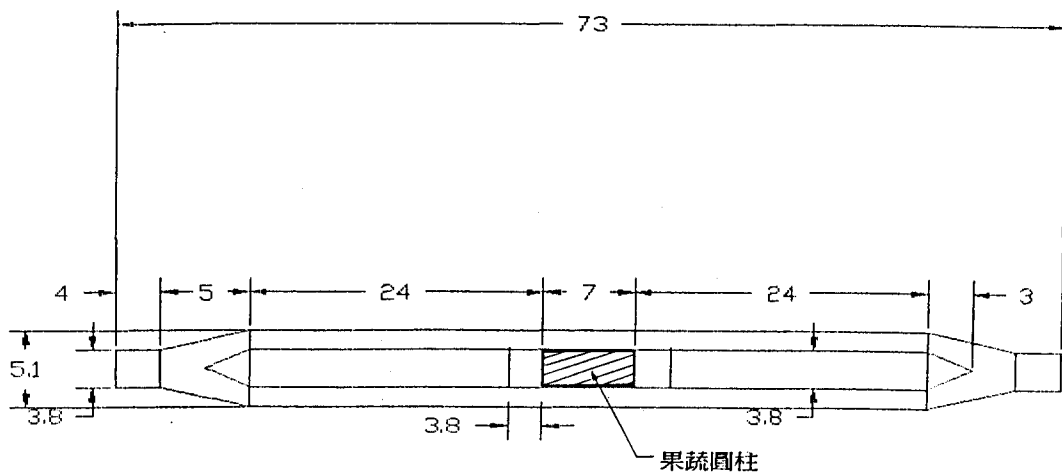
合併(7)、(8)二式，並因

$$K = \alpha \rho C \quad \text{及} \quad Bi = \frac{\theta h}{k}$$

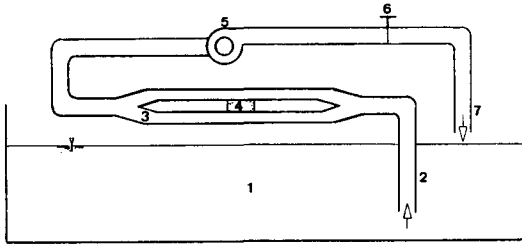
可得(9)式：



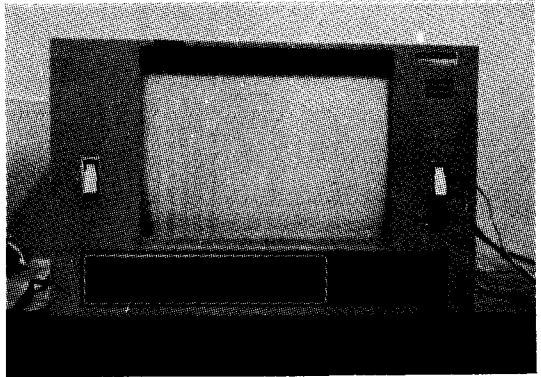
圖一、果蔬圓柱樣品和實驗裝置套管



圖二、放置果蔬圓柱樣品之套管尺寸和形狀



圖三、冰水循環示意



圖五、溫度紀錄儀

今  $K, \ell$  為已知,  $\rho, C, m$  為測量所得之值, 故  $h$  值可計算而得。此  $h$  值將為以後各果蔬測定時之固定邊界條件。

2. 將未知  $k$  值之各果蔬樣品置於受測位置, 重覆上述之實驗, 測得樣品內任何部位之溫度/時間變化關係, 由(6)式算得其斜率  $m$  值, 同樣代入(9)式, 可求得此果蔬樣品之  $k$  值。

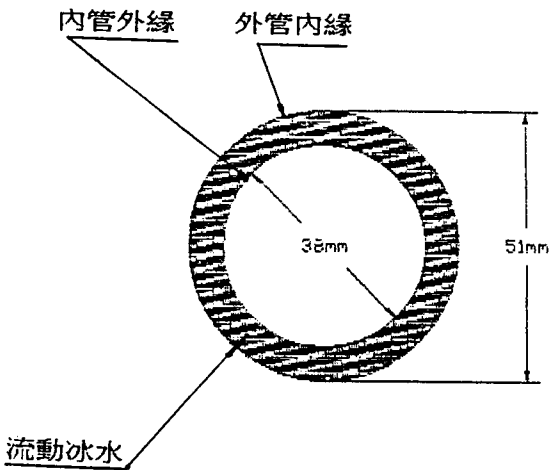
### 三、結 果

#### 1. 密度、含水率、比熱之量測

表一為八種果蔬之密度、含水率、比熱之測定及計算值。

表一 八種果蔬之密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、含水率 (w. b. %) 及比熱 ( $\text{KJ}/\text{kg}-^\circ\text{C}$ )

果 蔬 名	密度 $\rho$	含水率 $M$	比熱 $C$
紅 蘿 蔔	1.008	89.9	3.843
白 蘿 蔔	0.973	84.7	3.677
馬 鈴 薯	1.051	80.2	3.527
胡 瓜	0.891	97.3	4.098
涼 薯	0.991	91.6	3.909
冬 瓜	0.927	96.7	4.079
扁 蒲	0.794	92.8	3.939
竹 筍	0.970	94.3	3.999



1. 冰水槽; 2. 進水口; 3. 雙套管; 4. 受測物;  
5. 水泵; 6. 調節閥; 7. 出水口

圖四、冰水流通之環形通道

$$\frac{k}{\rho C} = -m\ell^2 \frac{1 + \frac{2.45}{(\ell h/k)^{1.04}}}{(2.4)^2} \quad (9)$$

- 式中  $k$  = 熱傳導係數  
 $\rho$  = 樣品之密度  
 $C$  = 樣品之比熱  
 $m$  = 溫度變化曲線之斜率  
 $\ell$  = 樣品之直徑  
 $h$  = 邊界對流之熱傳係數

2.對流熱傳係數之計算

表二為紅蘿蔔圓柱體在本試驗裝置冷却時之溫

度變化，冷却時間與溫度比對數值成線性相關，其相關係數即此線之斜率m，可由下式算出：

表二：紅蘿蔔圓柱體樣品冷却時之溫度變化

時間 (分) x	中 心 處			離 表 面 1.2cm 深 處		
	溫 度(°C) t	溫 度 比 T	ln T y	溫 度(°C) t	溫 度 比 T	ln T y
0	17.4			16.7		
1	17.1			15.2		
2	16.2	0.95	-0.0513	13.6	0.79	-0.236
3	14.8	0.86	-0.151	12.1	0.69	-0.371
4	13.4	0.78	-0.2485	10.7	0.61	-0.492
5	12.0	0.69	-0.371	9.4	0.53	-0.635
6	10.7	0.61	-0.494	8.4	0.46	-0.777
7	9.6	0.54	-0.616	7.4	0.40	-0.916
8	8.6	0.48	-0.734	6.7	0.36	-1.022
9	7.6	0.41	-0.892	5.9	0.31	-1.171
10	6.8	0.36	-1.022	5.4	0.28	-1.273
11	5.9	0.31	-1.171	4.8	0.24	-1.427
12	5.3	0.27	-1.309	4.3	0.21	-1.561
13	4.8	0.24	-1.427	3.9	0.18	-1.715
14	4.3			3.5		
15	3.8			3.2		
16	3.4			3.1		

說明：

試驗條件：圓柱半徑=1.9cm，柱高=6.9cm

密度=1.008 g/cm<sup>3</sup>，含水率=89.9%

初溫 t<sub>1</sub>=17°C，冰水溫 t<sub>∞</sub>=1°C

溫度比 T =  $\frac{t-t_{\infty}}{t_1-t_{\infty}}$ ，比熱 C=0.92 cal/g-°C

$$m = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (10)$$

式中 n = 時間座標上之測點數

x = 冷却時間(分)

y = 溫度比之對數值

以在圓柱體表面下1.2公分深處測得之數據代入上式，得：

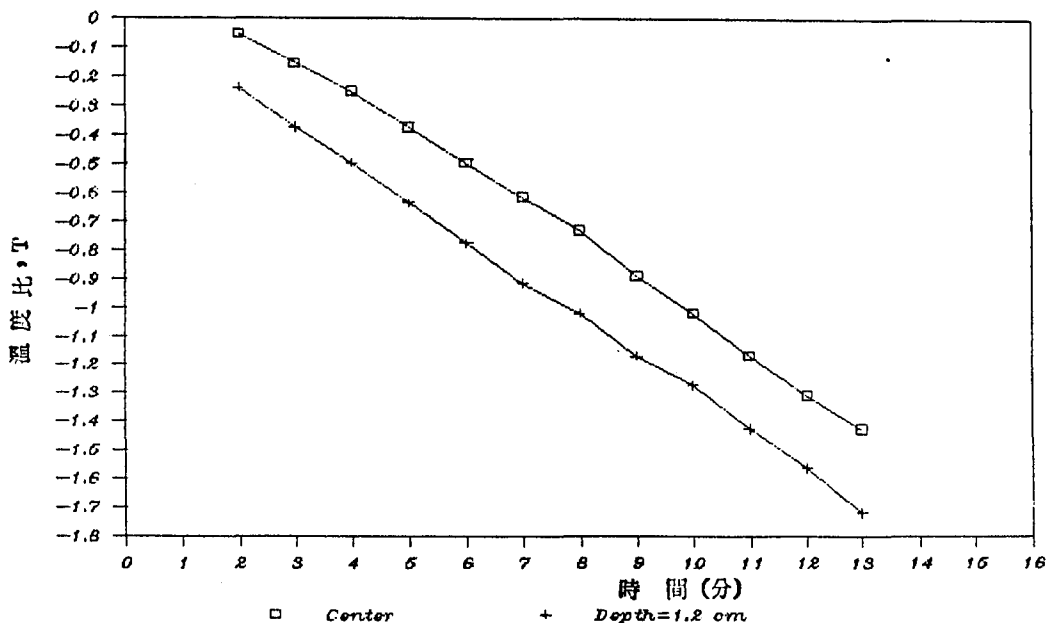
$$m = \frac{-1271.65 + 1043.64}{9816 - 8100} = -0.133 \text{ min}^{-1} \\ = -2.215 \times 10^{-3} \text{ Sec}^{-1}$$

今設此樣品之K值等於文獻所載之0.605w/m-°C (1.446×10<sup>-3</sup> cal/s-cm-°C)，再以 ρ、C、ℓ 等值及上面算得之m值代入(9)式，算得

$$h = 1.342 \times 10^{-2} \text{ cal/s-cm-°C} \\ = 561 \text{ w/m}^2\text{-°C}$$

圖六為半對數圖上紅蘿蔔冷却曲線之原始數據

3.熱傳導係數之測定



圖六、半對數圖上紅蘿蔔之冷却曲線

表三為八種蔬菜經本試驗裝置測定後所得之熱傳導係數。

表三、八種蔬菜之熱傳導係數之測定結果

品名	熱傳導係數 $w/m-c$			
	1	2	3	平均
紅蘿蔔	0.5734	0.6070	0.6404	0.6070
白蘿蔔	0.5399	0.5441	0.5399	0.5399
竹筍	0.5228	0.5228	0.5228	0.5228
扁蒲	0.3851	0.3934	0.3892	0.3892
馬鈴薯	0.5363	0.5363	0.5363	0.5363
胡瓜	0.5143	0.4976	0.5060	0.5059
涼薯	0.5352	0.5352	0.5352	0.5352
冬瓜	0.5018	0.5060	0.5060	0.5046

#### 四、討論

1. 用本試驗裝置和方法測得圓柱體物品表面之對

流熱傳係數約為  $500 w/m^2-^{\circ}C$  是陳 (1989) 文中所得  $197 w/m^2-^{\circ}C$  之二倍半；對本次所測八種蔬菜而言，其熱傳過程之 Bio 數 ( $lh/k$ ) 在 16 和 24 之間，比較以前之研究顯然有改進。

2. 如以解析法計算本試驗套管裝置內冰水對樣品之對流熱傳係數，其值達  $2800 w/m^2-^{\circ}C$ <sup>(3)</sup>，文獻上也有類似高 h 值之記載<sup>(5)</sup>。因若 Bio 數在 40 以上時，受測物表面溫度可視同冷却冰水之溫度<sup>(6)</sup>，如此可簡化計算，增加 k 值測定之準確度，因此，如何再改善實驗裝置，使其達致更高 h 值，值得繼續研究。

3. 用本試驗裝置和方法測得紅蘿蔔之熱傳導係數值為  $0.607 w/m-c$ ，符合文獻所載之  $0.605 w/m-c$ <sup>(8)</sup>，據此推論，其餘 7 種蔬菜之熱傳導係數之測得值應相當可信。

#### 五、致謝

本文承行政院國科會給予經費資助，臺大農機系同仁蕭介宗、李允中、林達德博士，與大農機系盛中德博士、省農試所農機系陳加忠博士惠賜寶貴意見，在此一併致謝。

## 六、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, 臺北
2. 陳貽倫 1989 果蔬熱傳導係數之測定農工學報 Vol 35, No. 1, pp. 5~15, 臺北
3. 張高郎1990柱狀樣品果蔬之熱傳導係數測定臺灣大學農機研究所碩士論文臺北
4. 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, 臺北
5. 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.
6. Heldman D. R., 1977. Food Process Engineering. AVI Publishing Co., Westport, Conn., U. S. A
7. Luikov, A. V., 1968. Analytical Heat Diffusion Theory. Academic Press, N. Y.
8. Mohsenin, N. N., 1980. Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials, Gordon & Breach Science Publishers, N. Y.

收稿日期：民國79年7月8日

接受日期：民國79年7月20日

(上接第35頁)

改良，以利香菇乾燥機之推廣應用。

## 八、誌 謝

本研究為結合產官學界的研究計畫。本計畫承經濟部工業局提供主要研究經費補助，順光股份有限公司提供配合款及技術支援合作研製香菇乾燥機，謹此致謝。計畫執行期間承工業局傅忠民先生，詹德薰先生協助與提供建議，並承順光公司江萬得副理和林煌烟課長，臺大農機系張漢聖教授、馮丁樹教授和劉昆揚教授，農試所彭金騰博士和香菇栽培界陳炳照先生、溫光成先生、王幼青先生、和趙守仁先生提供寶貴意見與協助，謹此一併致謝。承農機中心陳百惠小姐和王春銀小姐協助有關本計畫之行政工作，謹此一併致謝。試驗期間，研究助理陳宏濤先生幫忙甚多，特此致謝。

## 九、參考文獻

1. 李進興、李國康。1985。太陽能乾燥機多用途利

用研究與示範。73年農機研發展與示範推廣報告，農林廳。

2. 古川久彥。1986。86年版きのこ年鑑，農村文化社。
3. 平尾武司。1978。シイタケ乾燥法，農山漁村文化協會。
4. 許勳堅與吳錫寬。1986。臺灣香菇生產與經濟調查，臺灣省農林廳。
5. 陳秋仁。1982。臺灣香菇產銷之經濟研究，臺灣銀行季刊34(1)127-154。
6. 農委會。1983。香菇木屑塑膠包栽培，農民淺說二五五A，行政院農委會。
7. 邱芳洲。1984。香菇栽培百題，宜蘭縣香菇栽培技術協會。

收稿日期：民國79年1月8日

修正日期：民國79年4月26日

接受日期：民國79年9月11日