

以電腦模式估算速溶茶之質傳性質

Numerical Estimation of Diffusivity for Instant Tea

國立臺灣大學農工所機械組碩士

國立臺灣大學農機系副教授

洪 偉 智

陳 世 銘

W. J. Hong

Suming Chen

摘 要

由於製作速溶茶之茶湯為液體，雙面脫水之冷凍乾燥模式有其應用上之困難。因此本研究係依據雙面加熱單面脫水模式，以電腦模擬的方式來探討速溶茶在冷凍乾燥時的質傳性質，以作為實驗前的估算，並進一步與實驗值作一比較。本模式考慮質能平衡，並利用疊代及牛頓法等數值方法，以電腦程式估算出速溶茶之擴散係數為 $0.0035 \text{ m}^2/\text{s}$ ，此值與陳與洪 (1988) 求得之 $0.0029 \text{ m}^2/\text{s}$ 相當接近。此法可應用於實驗及工程規劃前之事先估算，並可推廣使用於其他農產品或食品。

關鍵詞：速溶茶、冷凍乾燥、擴散係數、電腦模擬

ABSTRACT

Since the tea extract is liquid, the application of two-side dehydration model to the freeze drying of instant tea is not practical. Therefore, the model of one-side dehydration and two-side heating was studied by the method of computer simulation to investigate the diffusivity of instant tea during the freeze drying processes. In this model the mass and energy balances were considered, Newton's method and iteration were used, and a computer program was written to calculate the diffusivity of instant tea. The calculated value is $0.0035 \text{ m}^2/\text{s}$, which is very close to the reported data, $0.0029 \text{ m}^2/\text{s}$, by Chen and Hong (1988). The model is good for the pre-analyses of experiments or engineering planning, and is also good to apply to other agricultural products.

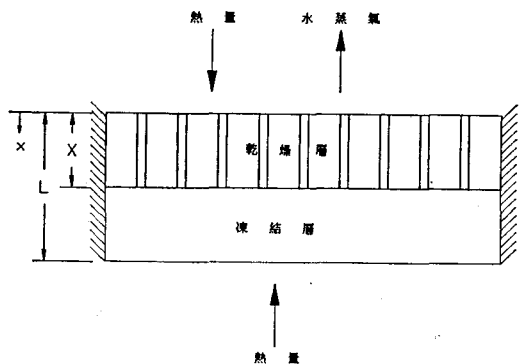
Keywords: Instant Tea, Freeze Drying, Diffusivity, Simulation

一、前 言

國內速溶茶之研製已初具規模。關於速溶茶的質傳性質，陳與洪 (1988) 曾以實驗方法利用雙面加熱雙面脫水模式作過一番研究，雖然此法已可算

出速溶茶的擴散係數，但作實驗必需具有冷凍乾燥機等設備，且在未實驗之前無法作一明確的評估。因此考慮以電腦模擬方式來估算速溶茶的質傳性質。又對於一般液態物料，如果汁、茶葉萃取液、咖啡萃取液等，因為冷凍前必用有底的容器承裝，所

以要採用雙面排水的乾燥方法比較困難，為配合實際生產情形，因此採用 Dyer 和 Sunderland (1968) 提出的另一個乾燥模式，考慮雙面加熱，但水蒸氣僅從一面排出的情況。在此模式中，熱量由物料的上下兩面傳入，而水蒸氣僅從一面排除，所以其內部僅產生一個乾燥層和一個界面，如圖一。



圖一 雙面加熱單面脫水模式

二、研究方法

1. 熱傳現象

外加的熱量分別由凍結層與乾燥層傳至昇華界面。假設凍結層與乾燥層內之熱量傳導均為準穩態 (Quasi-Steady)，因凍結層內僅存在單純的熱傳導現象，故其內部之溫度分佈可以如下之微分方程式表示

$$\frac{d^2 T_2}{dx^2} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

邊界條件是：x = X 時，T₂ = T_x
 x = L 時，T₂ = T_L

而乾燥層內除了熱量藉傳導現象由表面傳入外，水蒸氣從昇華界面移動到表面時也吸收熱量。假設水蒸氣的溫度隨時與其周圍的乾燥層達成平衡，則乾燥層之溫度分佈為

$$K_1 \frac{d^2 T_1}{dx^2} + N C_p \frac{dT_1}{dx} = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

邊界條件是：x = 0 時，T₁ = T₀
 x = X 時，T₁ = T_x

分別將邊界條件代入(1)、(2)式，解得

$$T_2 = \frac{x-X}{L-X} (T_L - T_x) + T_x \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$T_1 = T_0 - (T_0 - T_x) \frac{1 - \text{EXP}(-B \frac{x}{X})}{1 - \text{EXP}(-B)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

其中 $B = \frac{N C_p}{K_1} \quad \dots\dots\dots(5)$

以整個乾燥層為控容 (Control Volume) 來考慮其能量平衡，可以得到如下之方程式

$$K_2 \left. \frac{dT_2}{dx} \right|_{x=X} - K_1 \left. \frac{dT_1}{dx} \right|_{x=0} - N C_p (T_0 - T_x) = N H \quad \dots\dots\dots(6)$$

分別將 T₁、T₂ 代入上式，可得

$$K_2 \frac{T_L - T_x}{L - X} - K_1 \frac{B (T_x - T_0)}{1 - \text{EXP}(-B)} = N H + N C_p (T_0 - T_x) \quad \dots\dots\dots(7)$$

Mellor (1978) 認為上式中指數項 (B X) 遠小於 1，所以 [1 - EXP(-B X)] 可展開成 Taylor 級數，且二次以上的項均可忽略不計，因此，[1 - EXP(-B X)] ≈ B X，故上式簡化為

$$N X = \frac{K_2 X}{L - X} (T_L - T_x) - K_1 (T_x - T_0) \dots\dots\dots(8)$$

2. 質傳現象

水蒸氣在昇華界面形成，經乾燥層的孔隙排出，依雙氣體相互擴散模式 (Welty et al., 1984)，水蒸氣的質通量為

$$N_1 = \rho D \frac{dy_1}{dx} + y_1 (N_1 + N_2) \quad \dots\dots\dots(9)$$

假設乾燥層內的孔隙可視為平行排列的毛細管，在此毛細管中除了水蒸氣不斷排出外，其他的無活性氣體可視為凝滯不動，即 N₂ = 0，故(9)式可化簡為

$$N_1 (1 - y_1) = \rho D \frac{dy_1}{dx} \quad \dots\dots\dots(10)$$

邊界條件：x = 0 時，y₁ = y_{w0}
 x = X 時，y₁ = y_{wx}

將上式積分可得

$$N X = \rho D \ln \left(\frac{1 - y_{w0}}{1 - y_{wx}} \right) \quad \dots\dots\dots(11)$$

由式(8)、(11)可得

$$\frac{\frac{K2}{L-X} (TL - Tx) - K1(Tx - To)}{H + Cp(To - Tx)} = \rho D \ln\left(\frac{1 - ywo}{1 - ywx}\right) \dots\dots(12)$$

其中 $ywo = Pwo/Po \dots\dots(13)$

$ywx = Pwx/Px = f(Tx)/Px \dots\dots(14)$

又依據洪 (1988), $f(Tx)$ 可表示為

$$\frac{\frac{K2}{L-X} (TL - Tx) - K1(Tx - To)}{H + Cp(To - Tx)} = \rho D \ln \left\{ \frac{1 - (Pwo/Po)}{1 - f(Tx)/Px} \right\} \dots\dots(18)$$

其中 $Px = Po + \frac{\mu}{\rho \epsilon} \left\{ \frac{\frac{K2}{L-X} (TL - Tx) - K1(Tx - To)}{H + Cp(To - Tx)} \right\} \dots\dots(18a)$

又 Dyer 及 Sunderland (1966) 假設乾燥層內質傳是介於分子擴散及 Knudsen 擴散之間, 因而推導得下式:

$$ywx = 1 + \frac{b1}{\Delta P} \left\{ \frac{\ln(Po + \Delta P) + [b2(1 + \frac{Po}{\Delta P})]}{\text{EXP}[b2(1 + \frac{Po}{\Delta P})]} + \frac{\frac{1}{4}[b2(1 + \frac{Po}{\Delta P})]^2 + \frac{1}{18}[b2(1 + \frac{Po}{\Delta P})]^3 \dots}{\text{EXP}[b2(1 + \frac{Po}{\Delta P})]} \right\} + \frac{ywo - 1 - \frac{b1}{\Delta P} \text{EXP}(-\frac{Po}{\Delta P}) [\ln(Po) + \frac{Po}{\Delta P} + \frac{1}{4} (\frac{Po}{\Delta P})^2 + \frac{1}{18} (\frac{Po}{\Delta P})^3 \dots]}{\text{EXP}(b2)} \dots\dots(19)$$

其中

$$b1 = \frac{8}{3} \frac{S \rho D}{\pi Dk} \ln\left(\frac{1 - ywo}{1 - ywx}\right) \dots\dots(20)$$

$$b2 = \frac{D}{Dk} \ln\left(\frac{1 - ywo}{1 - ywx}\right) \dots\dots(21)$$

3. 電腦估算

Dyer 及 Sunderland (1968) 建議利用(18)、(19)式, 以試誤法 (Trial and Error) 來計算擴散係數。方法是:

- a) 對於任一昇華界面位置, 假設一個 Tx 值 (通常用凍結溫度)。
- b) 將 Tx 值代入(18)式, 計算出 D 值。
- c) 由(8)式計算出 NX 值。
- d) 由(7)式計算出 Px 值。
- e) 由(14)式計算出 ywx 值。
- f) 由(19)式計算出 D' 值。

$$f(Tx) = \text{EXP}(28.9131 - 6146.31/Tx) \dots\dots(15)$$

另外根據 Darcy's Law 定義 Slip Flow 流經多孔物質時的滲透性 (Permeability) 是

$$\epsilon = \frac{N \mu X}{\rho \Delta P} \dots\dots(16)$$

故 $Px = Po + \Delta P = Po + \frac{N X \mu}{\rho \epsilon} \dots\dots(17)$

將式(13)、(14)、(17)代入式(12), 得

g) 比較 D' 與 D 是否一樣, 若不一樣則以 D' 代替 D , 再由(18)式解得 Tx , 重覆 c) ~ g), 直到求得一致的 D 值。

此法需要一連串複雜的計算, 故嘗試以福傳程式語言 (FORTRAN Language) 寫一個電腦程式來執行這些重覆的計算工作。首先將原物料厚度分成數個 ΔX , 讓 $X = X + \Delta X$, 隨著 X 之改變重覆上述七步驟, 即可分別計算出每一個昇華界面位置時所對應之擴散係數。上述方法中利用(19)式求 D' 值及利用(18)式求 Tx 值這兩個步驟都是求方程式的根。解非線性方程式的根可以利用數值方法來近似。在本研究中, 解(19)式的 D' 是採用牛頓法 (Newton's Method) 來求近似根, 即

$$(D)'_{n+1} = (D)'_n - \frac{f(D)}{f'(D)} \dots\dots(22)$$

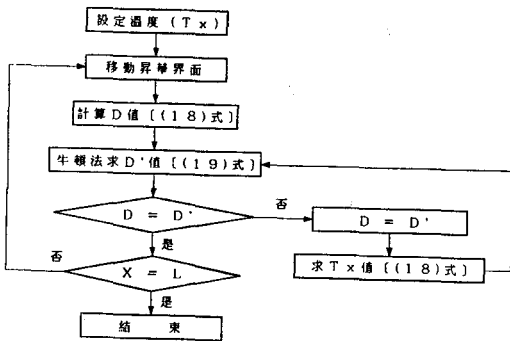
其中 $f(D)$ 乃(19)式移項而得, 如下式所示

$$f(D) = 1 - y_{wx} + \frac{b_1}{\Delta P} \left\{ \frac{\ln(P_o + \Delta P) + [b_2(1 + \frac{P_o}{\Delta P})]}{\text{EXP}[b_2(1 + \frac{P_o}{\Delta P})]} + \frac{\frac{1}{4}[b_2(1 + \frac{P_o}{\Delta P})]^2 + \frac{1}{18}[b_2(1 + \frac{P_o}{\Delta P})]^3 \dots}{\text{EXP}[b_2(1 + \frac{P_o}{\Delta P})]} \right\} + \frac{y_{wo} - 1 - \frac{b_1}{\Delta P} \text{EXP}(-\frac{P_o b_2}{\Delta P}) [\ln(P_o) + \frac{P_o b_2}{\Delta P} + \frac{1}{4}(\frac{P_o b_2}{\Delta P})^2 + \frac{1}{18}(\frac{P_o b_2}{\Delta P})^3 \dots]}{\text{EXP}(b_2)} \dots (23)$$

(22)式中之微分 $f'(D)$ 則是以 D 點前後極短距離的兩個點間的割線斜率來代替。另以(18)式求 T_x 時，原來也是採用牛頓法，但實際運算時常常造成發散現象，故改用簡單的二分法，例如找到 $f(T_1) > 0$ 、 $f(T_2) < 0$ ，則取 $T = (T_1 + T_2)/2$ ，其中之 $f(T)$ 乃(18)式移項而得，如下

$$f(T) = \frac{K_2 \frac{X}{L-X} (T_L - T_x) - K_1 (T_x - T_o)}{H + C_p(T_o - T_x)} - \rho D \ln \left\{ \frac{1 - (P_{wo}/P_o)}{1 - f(T_x)/P_x} \right\} \dots (24)$$

寫成之電腦程式流程如圖二，其電腦程式詳見洪(1988)。



圖二 電腦程式流程圖

如上法以電腦程式估算速溶茶之質傳性質時，除了 T_x 、 T_L 、 P_o 及 L 是實驗的條件外， K_1 、 K_2 、 ρ 、 μ 、 D_w 、 D_k 、 ϵ 、 S 、 H 及 C_p 都應是已知的性質。這些實驗條件及性質在本研究中所用之值如表一所示，其求法如下：

a) 速溶茶乾燥層的熱傳係數 (K_1)

有關速溶茶乾燥層的熱傳係數資料缺乏，不過由於一般冷凍乾燥後產品的熱傳導係數都很低，且變化不大，所以考慮利用咖啡、奶粉或蕃茄濃縮汁

表一 速溶茶實驗條件及物性估計值

	數 值	單 位	備 註
T_x	243	K	
T_o	273	K	
T_L	273	K	
P_o	45	Pa	
P_{wo}	22.5	Pa	P_o 的二分之一
L	0.025	m	
K_1	0.035	J/s-m-K	咖啡、奶粉、蕃茄濃縮汁
K_2	2.215	J/s-m-K	冰
ρ	0.00059	Kg/m ³	70[Pa], 258[K]
μ	0.00001	Pa-s	258[K]
D_w	0.00354	m ² /s	
D_k	0.0546	m ² /s	蔗糖汁孔隙半徑
ϵ	1 E(-9)	m ²	軟木板、香煙、毛氈
S	1	無	
H	2814339	J/Kg	
C_p	1867	J/Kg-K	在低壓下

冷凍乾燥的資料來估計。據Goldblith等人(1975)書上所列的資料，Fito, Pinaga 及 Aranda (1972) 研究咖啡粉 (Coffee Powder) 的熱傳導係數是 0.033 [J/s-m-K]; Kessler (1969) 研究奶粉 (Whole Milk) 的熱傳導係數是 0.02~0.08 [J/s-m-K]; Sharon, Berk (1969) 研究濃度 22 Brix 蕃茄濃縮汁 (Tomato Concentrate) 的熱傳導係數是 0.08~0.11 [J/s-m-K]。推斷速溶茶的性質應該較接近咖啡粉，所以假設速溶茶乾燥層的熱傳導係數為 0.035 [J/s-m-K]。

b) 速溶茶凍結層熱傳係數 (K_2)

由於速溶茶凍結層水分含量相當高，而且純固形物的熱傳導係數與冰的熱傳導係數相較之下顯得

相當低，所以整個凍結層的平均熱傳導係數可以用冰的熱傳導係數來取代。由 Ozisik (1985) 書上查得冰的熱傳導係數是 2.215 [J/s-m-K]，所以令 $K_2=2.215$ [J/s-m-K]。

c) 水蒸氣密度 (ρ)

在低溫低壓下，水蒸氣可視為理想氣體。所以水蒸氣密度可依理想氣體方程式計算。在本研究裏，水蒸氣所處的壓力範圍是 45~100 [Pa] 之間，溫度範圍是 243~273 [K] 之間，所以用平均壓力 $P=70$ [Pa]，平均溫度 258 [K]。又水的分子量為 0.018 [Kg/mole]，由理想氣體方程式知水蒸氣的密度為：

$$\rho = \frac{MP}{RT} = \frac{0.018 \times 70}{8.314 \times 258} = 5.9 \times 10^{-4} \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

d) 水蒸氣黏滯係數 (μ)

根據 Welty, Wicks 及 Wilson (1984) 指出，黏滯係數可表成

$$\mu = \frac{2}{3} \frac{\pi^{3/2}}{\pi^{3/2}} \times \frac{(M \times k \times T)^{0.5}}{d^2}$$

其中 k = Boltzmann 常數

d = 分子直徑

從上式可看出 μ 與 $(T^{1/2})$ 成正比，且不受壓力變化的影響。在 $T=380$ [K] 時，查得水蒸氣黏滯係數是 1.27×10^{-5} [Pa-s]，換算成 $T=258$ [K] 時， $\mu=1 \times 10^{-5}$ [Pa-s]。

e) 水蒸氣對空氣的相互擴散係數 (D_w)

Welty, Wicks 及 Wilson (1984) 認為一般氣體相互擴散的擴散係數可用下式表示：

$$D_{1,2} = \frac{0.001 \times T^{1.75} \times \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{M_a}\right)^{0.5}}{P \times [\nu_w^{1/3} + \nu_a^{1/3}]^2}$$

其中 ν_w = 水蒸氣的擴散體積 (Diffusion Volume) = 12.7

ν_a = 空氣的擴散體積 (Diffusion Volume) = 20.1

M_a = 空氣平均分子量 = 29 [g]

在溫度 (T) 為 258 [K]、壓力 (P) 為 70 [Pa] (= 0.00069 [atm]) 時，擴散係數 ($D_{1,2}$) 為

$$D_{1,2} = \frac{0.001 \times 258 T^{1.75} \times \left(\frac{1}{18} + \frac{1}{29}\right)^{0.5}}{0.00069 \times [12.7^{1/3} + 20.1^{1/3}]^2} = 283 \text{ [cm}^2\text{/s]} = 0.0283 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

當此擴散是發生在多孔隙內時，Satterfield (1980) 認為實際的擴散係數 (D_w) 應是

$$D_w = \frac{D_{1,2} \times \theta}{\tau}$$

其中 θ 是指孔隙空間與物料體積之比，其範圍在 0.3~0.7 之間； τ 是氣體分子實際移動距離與物料厚度之比，其範圍在 2~7 之間。他並認為在資料缺乏時假設 $\theta=0.5$ ， $\tau=4$ 是合理的。所以

$$D_w = \frac{0.0283 \times 0.5}{4} = 0.00354 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

f) 水蒸氣的 Knudsen 擴散係數 (D_k)

Satterfield (1980) 認為 Knudsen 擴散係數可表為

$$D_k = 97000 \times r \times \left(\frac{T}{M}\right)^{0.5} \times \frac{\theta}{\tau}$$

其中 r 為速溶茶孔隙半徑 [cm]。由於 r 的值沒有資料，又 Mellor (1978) 書上記載蔗糖汁的孔隙半徑是 119 [μ m]，所以用此值來代表 r 。將各值代入上式，得

$$D_k = 97000 \times 1.19 \times 10^{-2} \times \left(\frac{258}{18}\right)^{0.5} \times \frac{0.5}{4} = 546 \text{ [cm}^2\text{/s]} = 0.0546 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

g) 水蒸氣對冷凍乾燥速溶茶的滲透性 (ϵ)

據 Scheidegger (1960) 書上所列的資料，Brown 及 Bolt (1942) 研究軟木板 (Cork Board) 及香煙 (Cigarette) 的滲透性分別為 1.5×10^{-9} ~ 3.3×10^{-10} [m^2] 與 1.1×10^{-9} [m^2]。另 Brown 及 Bolt (1948) 研究毛氈 (Hairfelt) 的滲透性則介於 1.2×10^{-9} ~ 8.3×10^{-10} [m^2] 之間；因此假設速溶茶的滲透性為 1×10^{-9} [m^2]。

h) 擴散反射係數 (S)

Mellor (1978) 認為在通常情況下，擴散反射係數可視為 1。

i) 冰之昇華熱 (H)

King (1971) 說在冷凍乾燥裏冰的昇華熱約 1200 [Btu/lb]；Tressler, Van Arsdell, Copley (1973) 則說是 1220 [Btu/lb]。在本研究裏取其平均值 $H=1210$ [Btu/lb] = 2814339 [J/Kg]

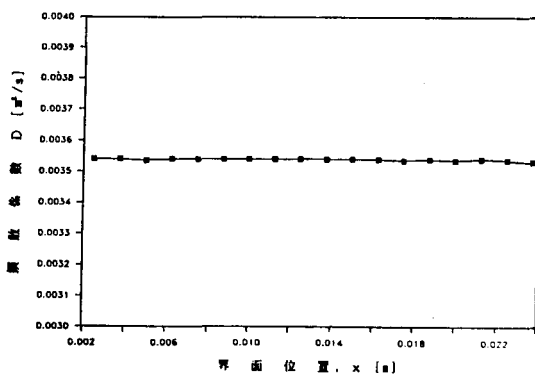
j) 水蒸氣比熱 (C_p)

從 Reynolds 及 Perkins (1978) 書上查得

水蒸氣在低壓狀態的比熱為 $0.446[\text{Btu}/\text{lb-R}] (= 1867[\text{J}/\text{Kg-K}])$ 。

三、結果與討論

運用上述之電腦程式，把表一所列的各種實驗條件及性質代入程式中，經運算後可得到整個乾燥過程中速溶茶質傳性質的變化，如圖三（程式中以數值方法所作的運算其疊代次數約在十次以內）。由圖上可知質傳係數變化很小，始終保持在 $0.0035 [\text{m}^2/\text{s}]$ 左右，由這一點可以判斷原先認定此一質傳性質在乾燥過程中保持定值的假設是正確的。



圖三 擴散係數與界面位置之關係

(18)式適用於分子擴散運動，而(19)式則適用介於分子擴散 (D_w) 與 Knudsen 擴散 (D_k) 之間的質傳運動，這兩個式子之適用範圍並不完全一樣，而我們電腦程式中却以它們作對等之比較（圖二），是否適當？在此我們引進一個有效擴散係數 (Effective Diffusion Coefficient, D_e) 的觀念：

$$\frac{1}{D_e} = \frac{1}{D_w} + \frac{1}{D_k} = \frac{D_w + D_k}{D_w D_k} \dots\dots\dots(25)$$

當 D_w 遠小於 D_k 時，上式可化簡為

$$\frac{1}{D_e} = \frac{D_k}{D_w D_k} = \frac{1}{D_w} \dots\dots\dots(26)$$

如前所述， $D_k = 0.0546 [\text{m}^2/\text{s}]$ ，而 $D_w = 0.00354 [\text{m}^2/\text{s}]$ ， D_k 約為 D_w 的 15 倍，所以(26)式成立，亦即 $D_w \approx D_e$ ，也就是說(19)式中雖表示介於分子擴散與 Knudsen 擴散之間的質傳運動，但本研究中之速溶茶的質傳現象在實際上 Knudsen 擴散的貢獻不多，主要仍為分子擴散，所以在此情況

下(18)、(19)式可以並用。

陳與洪 (1988) 曾以實驗方法求得雙面脫水模式之速溶茶擴散係數為 $0.0029 [\text{m}^2/\text{s}]$ ，而本研究利用電腦模擬求得單面脫水模式之速溶茶擴散係數為 $0.0035 [\text{m}^2/\text{s}]$ ，兩者相當接近。如果電腦模擬所需之相關性質及資料（如表一所列）能有較確定的數值，則此法相當值得採行作為實驗前的估算之用。尤有甚者，此法可求得乾燥過程中擴散係數之變動情形，有助於更進一步了解冷凍乾燥過程之工程現象。除了速溶茶外，此法應可推廣應用於其他果汁類產品，以估算其質傳性質。另外，利用雙面脫水模式求擴散係數僅在質傳控制 (Mass Transfer Control) 的情況下適用，而本模式（單面脫水模式）已同時考慮質能平衡，因此可以不必考慮是否為質傳控制情況。

進一步使用此法，除了表一所列之相關性質及資料須再探討及研究外，若(1)式之邊界條件改為

$$x = X \text{ 時, } T_2 = T_x$$

$$x = L/2 \text{ 時, } dT_2/dx = 0$$

則計算出來的凍結層溫度分佈 (T_2) 變成一定值 ($= T_x$)，將此結果代入(6)式，即可消去凍結層熱傳導係數 (K_2)，故可嘗試利用此法，以一個模式同時描述出雙面與單面脫水兩種乾燥方式。

四、結 論

陳與洪 (1988) 曾以實驗方法利用雙面加熱雙面脫水模式作過研究，且計算出速溶茶之擴散係數，但一般液體物料，如果汁、茶湯，冷凍前須用有底的容器承裝，所以採用雙面脫水之乾燥方法有其困難。因此本研究以電腦模擬之方式，利用疊代及牛頓法等來估算單面脫水之速溶茶擴散係數，若速溶茶的質傳性質由單面脫水模式以電腦程式模擬計算，此法估算所得之擴散係數為 $0.0035 [\text{m}^2/\text{sec}]$ 。本法計算結果雖與陳與洪 (1988) 利用實驗方法所得之值略有差異，但若速溶茶及其他相關性質資料能有較確定之數值，則此法可於求得更精確的擴散係數。由於電腦模擬可用於實驗及工程事之先估算，其應用可推廣至其他農產品或食品。

五、誌 謝

研究其間承蒙臺大農機系李允中博士提供寶貴意見，謹此誌謝。

六、符號說明

- b1 : 參考(2)式之定義
 b2 : 參考(2)式之定義
 B : 參考(5)式之定義
 Cp : 水蒸氣比熱 [J/Kg-K]
 D : 乾燥層的水蒸氣擴散係數 [m^2/s]
 Dk : Knudsen 擴散係數 [m^2/s]
 Dw : 水蒸氣在空氣中之擴散係數 [m^2/s]
 f(Tx) : 表示在Tx溫度時的飽和蒸氣壓 [Pa]
 H : 冰的昇華熱 [J/Kg]
 K1 : 乾燥層熱傳導係數 [J/s-m-K]
 K2 : 凍結層熱傳導係數 [J/s-m-K]
 L : 物料厚度 [m]
 N : 水蒸氣質通量 [$\text{Kg}/\text{m}^2\text{-s}$]
 N1 : 第一種氣體的質通量 [$\text{Kg}/\text{m}^2\text{-s}$]
 N2 : 第二種氣體的質通量 [$\text{Kg}/\text{m}^2\text{-s}$]
 Po : 乾燥室之全壓 [Pa]
 Px : 昇華面之全壓 [Pa]
 Pwo : 乾燥室之水蒸氣分壓 [Pa]。在本程式中
 依據 Dyer 及 Sunderland (1968) 之
 假設，定為 Po 的二分之一
 Pwx : 昇華面之水蒸氣分壓 [Pa]
 R : 氣體常數 [$\text{Pa}\text{-m}^3/\text{mole}\text{-K}$]
 S : 擴散反射係數 [無因次]
 T : 溫度 [K]
 T1 : 乾燥層內部溫度分佈
 T2 : 凍結層內部溫度分佈
 TL : 物料下表面溫度 [K]
 To : 物料上表面溫度 [K]
 Tx : 昇華界面溫度 [K]
 x : 物料厚度方向之座標軸 [m]
 X : 昇華界面位置 [m]
 y1 : 第一種氣體的莫爾分率 [無因次]
 ywo : 乾燥室內的水蒸氣莫爾分率 [無因次]
 ywx : 昇華界面的水蒸氣莫爾分率 [無因次]
 ε : 速溶茶的滲透係數 [m^2]
 μ : 水蒸氣黏滯係數 [$\text{Pa}\text{-s}$]
 ρ : 水蒸氣密度 [Kg/m^3]

七、參考文獻

1. 洪偉智。1988。速溶茶在冷凍乾燥時的質傳性質。碩士論文，臺大農機系，臺北。
2. 陳世銘，洪偉智。1988。以實驗方法研究速溶茶之質傳性質。中國農業工程學報，34(3)：

117-123，台北。

3. Dyer, D. F. and J. E. Sunderland. 1968. Heat and Mass Transfer Mechanisms in Sublimation Dehydration. Journal of Heat Transfer, Nov. 1968, P. 379.
4. Dyer, D. F. and J. E. Sunderland. 1966. Bulk and Diffusional Transport in The Region Between Molecular and Viscous. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 9, P. 519.
5. Fox, E. C. and W. J. Thomson. 1972. Coupled Heat and Mass Transport in Unsteady Sublimation Drying. A. I. Ch. E. Journal, Vol. 18, No. 4 P. 792.
6. Goldblith, S. A., L. Rey and W. W. Rothmayr. 1975. Freeze Drying and Advanced Food Technology. Academic Press Inc. Ltd.
7. Harper, J.C. 1962. Transfer Properties of Gases in Porous Media at Reduced Pressure with Reference to Freeze-Drying. A. I. Ch. E. Journal Vol. 8, No. 3, P. 298.
8. King, C. J. 1971. Freeze-drying of foods. C. R. C.
9. Mellor, J. D. 1978. Fundamentals of Freeze-Drying. Chapter 1~5. ACADEMIC Press.
10. Ozisik, M. N. 1985. Heat Transfer—A Basic Approach. McGraw-Hill Book Company.
11. Reynolds, W.C. and H.C. Perkins. 1978. Engineering Thermodynamics. McGraw-Hill Book Company.
12. Scheidegger, A. E. 1960. The Physics of Flow Through Porous Media. University of Toronto Press.
13. Satterfield, C. N. 1980. Heterogeneous Catalysis in Practice. McGraw-Hill Book Company.
14. Tressler, D. K., W.B. Van Arsdel and M. J. Copley. 1968. The Freezing Preservation of Foods. Vol. 3. The AVI Publishing Company.
15. Van Arsdel, W. B., M. J. Copley and A. I. Morgan 1973. Food Dehydration. Vol.1,3. The AVI Publishing Company.
16. Welty, J. R., C. E. Wicks and R. E. Wilson. 1984. Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer. 3rd ed. John Wiley & Sons Inc.