

食品乾燥における有効表面積に関する一考察

保坂秀明・伊原 潔・久保田 清・鈴木寛一

広島大学生物生産学部
1980年10月9日受理

An Examination on Effective Drying Surface Area of Cellulosic Foods

Hideaki HOSAKA, Kiyoshi IHARA, Kiyoshi KUBOTA and Kanichi SUZUKI

Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University, Fukuyama

序 言

恒率乾燥期間における乾燥速度は、絶乾物基準の含水率を W 、被乾燥材料の有効表面積を A 、境膜伝熱係数を hc 、蒸発潜熱を λ 、材料表面温度を t_s 、熱風温度を t_a 、乾燥期間を θ とすると次式であらわされる。

$$\left(\frac{dW}{d\theta}\right)_c = \frac{hcA}{\lambda} (t_a - t_s) \quad (1)$$

食品のような生物体では、乾燥の進行に伴い収縮して、見掛けの表面積が小さくなるのが通例である。この場合(1)式の有効表面積 A は縮小しているのか、そのままなのかによって乾燥速度は違って来る筈である。

一方、乾燥時の表面積の収縮については、Kilpatrickらは A_0 を初期含水率 W_0 における面積、 A を含水率 W になったときの面積として、次式を呈示した。

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{W + 0.80}{W_0 + 0.80}\right)^{2/3} \quad (2)^1$$

これに対して、筆者らは各種の根菜類について、収縮の状況を写真撮影し、収縮面積を目の細かい方眼紙より読み取り、乾燥初期の高含水率範囲では次式が当てはまるとした。

$$\frac{A}{A_0} = \left[\frac{W + W_e \left\{ \left(\frac{1}{\rho_e} \right) - 1 \right\} + 1/\rho_e}{W_0 + W_e \left\{ \left(\frac{1}{\rho_e} \right) - 1 \right\} + 1/\rho_e} \right]^{2/3} \quad (3)^2$$

ここで、 W_e は平衡含水率、 ρ_e は平衡時の材料密度である。(2)、(3)式の A を有効表面積とすれば(1)式の乾燥速度式の A は含水率の変化に伴い経時的に変化することになる。そこで、本実験は、1)顕微鏡による乾燥収縮の観察、2)金属蒸着による表面積の測定、3)乾燥速度について行ない、有効表面積についての考察を進めることを目的としたものである。

実 験 装 置

1 乾燥速度測定乾燥装置

装置本体は径107mmφ、高さ400mmで、下部の分散板により熱風を送り込む通風型乾燥装置である。温度、湿度は自動的に調節し、通気量はオリフィス流量計によって調節され、試料の含水量変化は乾燥実験用天秤により測定された。

ii 表面積観察用乾燥装置

実験装置のフローシートを Fig. 1 に示す。

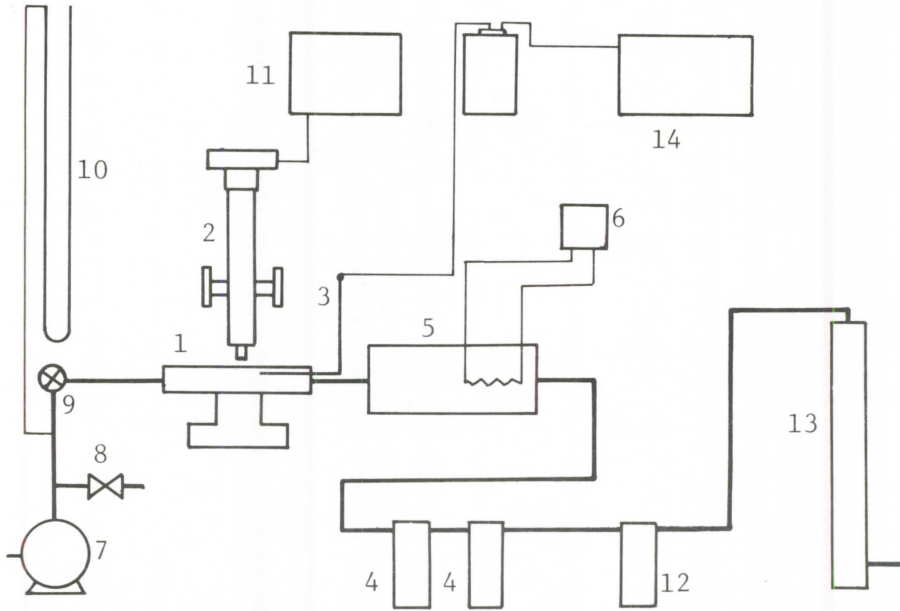


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

乾燥室(1)は、上面はプラスチック板、側面および底面はガラス板で構成(従 90 × 横 16 × 高さ 6 mm)し、上面のプラスチック板には、22 × 16 mm の顕微鏡用の覗き窓を明け、カバーガラスで閉じられている。光学顕微鏡(2)、熱電対(3)は銅-コンスタンタン、洗滌瓶(4)は硫酸濃度を変えて湿度調整用、加熱部(5)は 2 インチガラス管で管長 170 mm で内部に 0.0265 Ω のニクロム線ヒーターを内蔵し、変圧器(6)でヒータの調節をした。

真空ポンプ(7)は送風用、ストップバルブ(8)、ニードルバルブ(9)は風量調節用、水銀マンオメータ(10)は真空ポンプの圧力測定用、顕微鏡写真装置(11)、除湿ビン(12)は流量測定器(13)の飛沫水滴除去用、記録計(14)は熱電対(3)と接続して乾燥室(1)内温度を測定した。

実験方法

i 顕微鏡による乾燥収縮の観察方法

Fig. 1 の乾燥室内を 40 °C、空気流速 58.0 cm/sec に設定し、支持台に試料を上げ、カバーガラスで蔽って、自動写真撮影装置で、一定時間毎に撮影した。

ii 表面積の測定法³⁾

先づ試料より鋳型(レプリカ)を作製する。アセチルセルロースフィルムを酢酸メチルの中に数秒浸し、表面が溶解したアセチルセルロースフィルムを試料に押しあて、酢酸メチルを気化しフィルムが固定するのを待ってレプリカを試料より取りはずす。

金属の真空蒸着(シャドーイング)を行うため、各種金属(Pt, Au-Pd, Al, Fe, Zn)について予備試験を行い、Al を適当と認め、さきのレプリカを用い、真空蒸着装置により、蒸着角度 20°, 30°, 45° で行い、膜厚 50 ~ 300 Å のものを得た。

このようにしてシャドーイングしたレプリカの顕微鏡写真を取り次の方法で表面積を計測した(Fig. 4)。まず、1 個の細胞について、Fig. 2 の左図のようにモデル化し、これを n 等分する。中心線を f_1 とし、そ

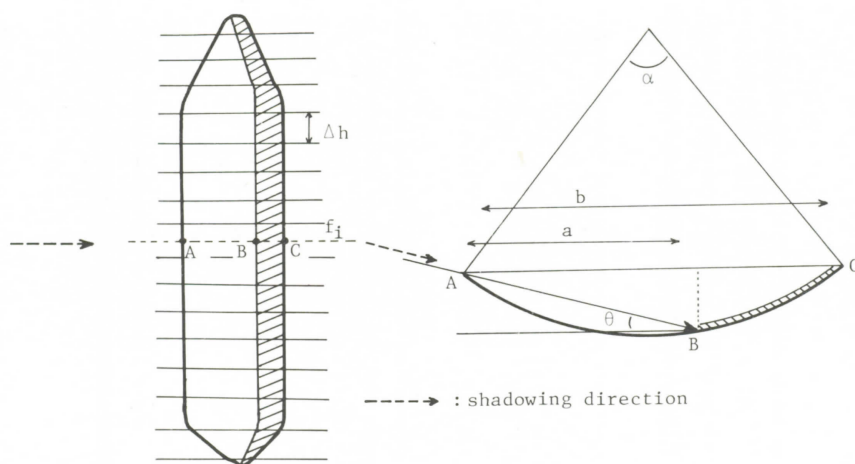


Fig. 2 Calculation method of surface area

の線上に点A, B, Cをとる。ABの長さを a , ACの長さを b とし, a, b を写真より実測する。点A, Cは写真面に平行な平面内にあると仮定し, Fig. 2の右図のようにACを $x-y$ 座標軸に適当にとる。点Bは蒸着角度 θ と実測値 a から $a \tan \theta$ で座標が決定できる。次に $\triangle ABC$ に内接する円弧の中心を求め半径 r を知り, 中心角 α を算出する。このようにして, 断面を円弧に近似し, 弧ACの長さが, 半径および中心角 α より算出される。ついで写真面の一定の枠内の細胞を数え, 全体の表面積を算出した。

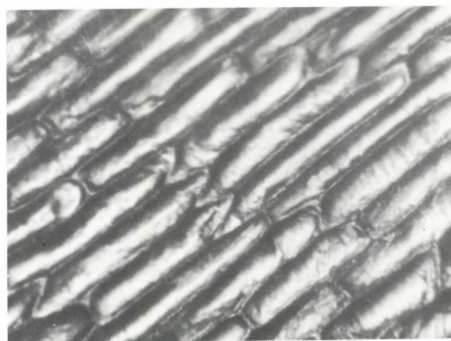
実験の結果および考察

i 表面積収縮の観察

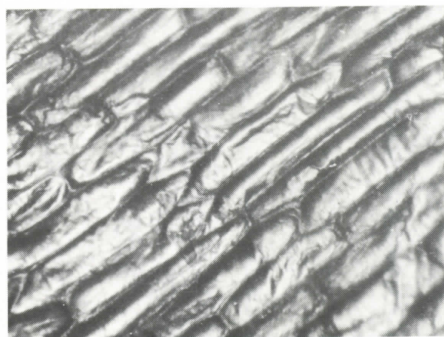
試料としては細胞間の影響を避けるため, 単層細胞であるタマネギの内皮を用いた。Fig. 1の装置を用い乾燥しつつ顕微鏡撮影により観察した。乾燥熱風の条件は, 40°C , R.H. 43%, 流速 32.1cm/sec で, 顕微鏡倍率40倍で乾燥開始より30秒毎に撮影した結果の例をFig. 3に示す。

飽和状態にある細胞は, 乾燥が進行するに伴って, セルロイドのおもちゃを, へこました様な非弾性的な体積収縮を起してゆき, あたかも表面積の減少はないかの様である。しかし, 写真面方向の投影した表面積は, 乾燥の進行に伴って減少し, 乾燥末期では乾燥初期のものに比べて明らかに小さくなっている。

しかし, これらの現象だけでは表面積が実際に減少しているのか, 凹凸の増加により投影した表面積が見掛け上減少しているのにすぎないのか判断はつけがたい。



(0 sec)



(60 sec)

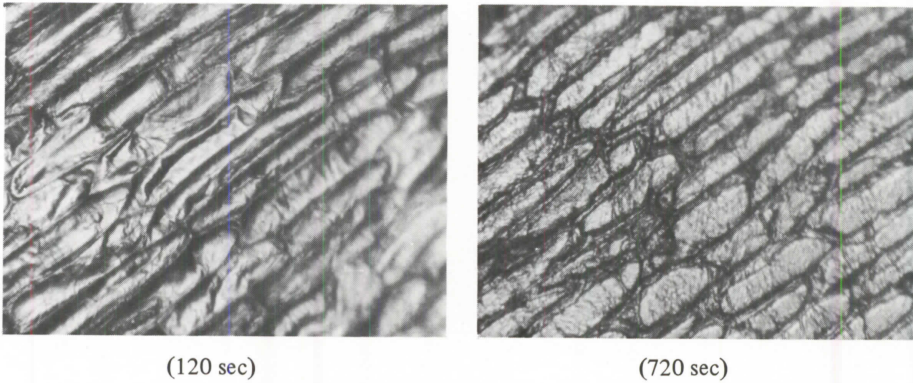
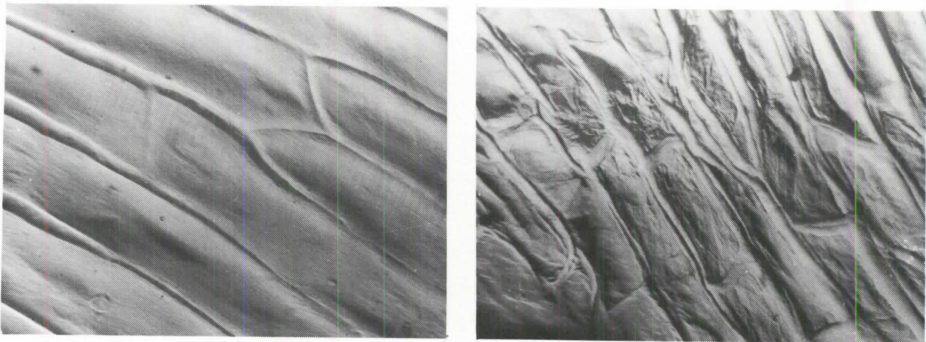


Fig. 3 Microscopic observation of change in shape of cellular surface of onion epidermis during the drying (temp. : 40 °C, R.H. : 43%, u : 0.32 m/sec, x 40)

ii 表面収縮の計算

AIによる蒸着角度 45°, 膜厚 300 Å の金属蒸着 (Fig. 4) による計算では, 飽和状態におけるタマネギ表面積は平板の側面積を無視した場合, 3.0 × 3.0 × 0.048 cm の平板における真の表面積として 32.76 cm² と計算された。しかし, 凹凸を考慮しない見掛け上の表面積は 18.0 cm² であることから比較すると 1.82 倍あることになる。したがって, (1)式の面積Aを見掛け上の面積とするか, 真の面積にするかに乾燥速度は面積あたり 1.82 倍の差を生ずることになることが判明した。なお, 膜厚についてはWilliams⁴⁾の計算式を用いた。



W = 8 kg-H₂O/kg-d.m.

W = 4 kg-H₂O/kg-d.m.

Fig. 4 Replica images of onion epidermis

iii タマネギ内皮と寒天ゲル平板の乾燥速度の比較

Table 1. Comparison of the drying rates of onion epidermis with those of agar gel plate

-dw/A.dθ [kg/m ² ·h]	
onion epidermis	agar gel plate
41.2	38.9
39.2	36.7
42.3	41.1
40.0	40.2
-	37.4

ta : 40.0 °C, R.H. : 43%, u : 0.32 m/s.

乾燥速度の比較的近似するタマネギ内皮と寒天ゲル平板の乾燥速度をさきの実験装置で説明した乾燥速度測定用の通気式乾燥装置で測定した。寒天ゲルはガラス表面で成形した表面が平滑な薄片である。測定された乾燥速度を見掛け上の表面積当たりとして表1に示す。

タマネギ表皮と寒天ゲル平板の乾燥速度は殆んど変りなく, さきのタマネギ表皮の見掛け上の表面積と凹凸を考慮した真の表面積に生じたような大きな差が見られない。したがって, 本実験で見る限りに

おいては、タマネギ細胞による凹凸による真の表面積は乾燥速度式（1）式の有効表面積とはならず、見掛上の表面積を有効表面積として差支えないことになる。

謝 辞

本実験に当り、食品物理学教室の岡田正和教授、宇都宮泰明助教授に御指導と御協力を賜りましたことに深く謝意を表します。

引 用 文 献

- 1) KILPATRICK, P.W., LOWE, E. and VAN ARSDEL, W.B.: *Advances in Food Research*, 6, 360 (1955).
- 2) 保坂, 久保田, 鈴木; *食品工学*, 67, 共立出版, 東京 (1975).
- 3) 安達, 石原, 岡田ら; *電子顕微鏡利用の基礎*, 167, 共立出版, 東京 (1975).
- 4) WILLIAMS, R.C. & BACKUS, R.C.; *J. Appl. Phys.* 22, 11 (1951).

Summary

The effective drying surface area of cellulosic foodstuffs was investigated in this study. Onion epidermis was used as a sample. It was dried in an air dryer, and the changes in shape of the epidermis cells in the drying process were microscopically observed and photographed. The results showed that the volume of the cell decreased or collapsed and its surface ruffled gradually as the drying process proceeded. But the projection area of the cells did not vary so much. Thus it was considered that the change in net surface area of the epidermis might be little, though the volume change of the cells was of an appreciable amount. This assumption was verified by calculating the net surface area from the replica images of onion epidermis. The net surface area was proved to be about 1.8 times as large as the apparent surface area. However, the drying rates per unit apparent area of agar gel plate with a smooth surface were nearly equal to those of onion epidermis. Therefore, we concluded that the effective drying surface area of cellulosic foodstuffs might be approximated to the apparent surface area.