九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

生鮮農産物の表面乾燥理論

村田, 敏
九州大学農学部

内田, 進
九州大学農学部

中馬, 豊
九州大学農学部

https://doi.org/10.15017/23092

出版情報：九州大學農學部學藝雑誌. 26 (1/4), pp.321-330, 1972-03. 九州大學農學部
バージョン：
権利関係：

九大農学芸誌 (Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ.)
第26巻 第1-4号 321-330 (1972)

生鮮農産物の表面乾燥理論

村田 敏・内田 進・中馬 豊

Surface drying theory of fresh farm products by heated air

Satoshi Murata, Susumu Uchida
and Yutaka Chuma

最近我々が口にしているミカンは，ほとんどが大規模の選果包装施設を通つてきたものといつてよい．この中では必ず，洗滌し乾燥する行程が入る．また，リンゴの選果包装施設においても将来アメリカにおけるように，農薬除去の目的で洗滌の行程が加わる公算が大きい．その他多くの生鮮農産物が，将来は洗滌され，清潔な状態で包装されて出回ることであろう．

さて，一般に洗滌された生鮮農産物は，付着した水を除去することが必要である．さもないと鮮度低下の原因になるし，また，次の段階におけるコーティングその他に支障を来たす．更に重量が正確でなくなり，消費者の疑惑を招きやすい．従つて，洗滌の行程にひき続いて，表面付着水分除去の過程が必須となる．この水分除去法には，機械的に拭いとる方法も考えられるが，大量の処理には今のところ適当な方法が見つからないし，また不完全であるので，乾燥が最も重要である．

一般に，乾燥過程[7]は予熱乾燥期間，恒率乾燥期間，減率乾燥期間に分けられ，さらに減率乾燥期間は減率第1段と減率第2段に分けられる．このうち，一般には恒率乾燥期間と減率乾燥期間が重要で，時間的にも，蒸発水分量からみても，この期間がほとんどを占める．従つて，複雑であるし，実際上の意味も少ないとして，予熱乾燥期間は無視されており，その研究は充分ではない．普通には，物体の温度は一定として計算される．

ここで取り上げた，生鮮農産物の表面乾燥は予熱期間に行なわれるものであつて，且つ温度分布が極めてはつきり存在する場合である．これは鮮度の低下を防ぐため，内部まで温度を上昇させず，また，農産物自身の水分を乾燥させないで表面付着水分だけにとどめること，および乾燥装置の大きさおよび作業時間の制約のためである．従つて，一般に用いられている計算法や考え方でこれを処理することは出来ない．次に一例を挙げよう．

普通，ミカンの選果場ではこの乾燥行程は天気の良い時には順調であるが，雨天には乾燥が悪くなり，次の段階のコーティングに支障を生じている所が多い．一般にこのような事態に備えて，灯油バーナによつて加熱通風が行なわれるようになつているが、ほとんどその効果が認められていない．

さて，雨天時に乾燥が悪くなるのは，空気中の相対湿度（以下，湿度という）が大きくなつて飽和に近づくことに原因があることは明らかである．従つて，普通の考え方であれば，相対温度を加熱によつて上昇せしめてやればよいことになるであろう．例えば，天気のよい日の湿度60％の状態に，雨天時の湿度85％の空気を加熱によつて変えればよいことになる．これは福岡の11月の平均温度を12℃として，[16]空気線図[10]から17.5℃の状態すなわち5.5℃の温度上昇によつて得られる．このような温度上昇は，福岡県糸島農協選果場を例にとつてみると，乾燥機の風量73 m³/min（ダンパ最開，標準100m³/min，1900 r.p.m. 18 mmAq）として，僅か1 l/hrの灯油を燃焼すれば得られる．しかし実際には，晴天時には常温通風で充分な結果が得られているにもかかわらず雨天時におけるこの程度の風温上昇は，乾燥の状態を全くといつてよい程改善しないのであつて，その原因は，この乾燥が極めて短時間（1分程度）で且つ，被乾燥物の形状が大きいために，乾燥空気の湿度に付着水分が平衡しないことによる．

このような問題に適切な処方を与えるためには，定量的な理論が必要であるが，そのためには基礎方程式を与えなければならない．この研究は，この基礎方程式とそれに基く計算結果および応用である．

1. 基礎方程式

洗滌農産物の表面は水滴で覆われ，自由水面における乾燥と同じく，その表面水の蒸気圧と大気中の蒸気圧差に基づいて水分の移動が起る．すなわち，

$$\frac{dw}{dt}=SR'(p-p_w) \qquad (1)$$

で表わされる．または拡散の方程式に基づけば

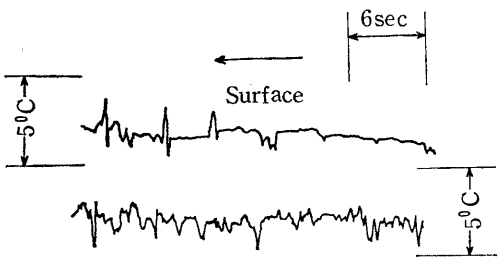
$$\frac{dw}{dt}=SR(H-H_a) \qquad (2)$$

となる．

恒温乾燥では平衡状態にあつて大気の条件は一定で，且つ被乾燥物体の温度を一定と考えており，熱伝達によつて流入した熱量はすべて蒸発の潜熱に変わるとみて，熱伝達率 h を用い

$$\frac{dw}{dt}=S(T_a-T)/\sigma \qquad (3)$$

としている．この T は，濡れた面が大気と平衡している状態を考えれば，湿球温度とみなしてよい．我々が湿度を測定するとき乾球と湿球の温度差を読んでいることからも，平衡状態にある乾燥が湿度によつて決まることがこの式から明らかである．しかし Fig. 1 に示すように，福岡県糸島郡農協で，夏ミカンの表面



3 mm under surface
Date : July 3, 19 : 15, 1969
Heated air temperature : 57.0°C
Natural air temperature : dry 25.2°C
wet 23.0°C
Dimension of NATSU DAIDAI :
weight 388.1 gr
diameter 100 mm

Fig. 1. Temperature rising in actual surface drying process of Citrus Natsu Daidai.

および 3 mm 表面下の温度を 0.1 mm 熱電対で測定した結果では，57°C の熱風（湿球温度計算値 30°C）に対して乾燥行程においては明らかに温度上昇中で，約 23°C のミカン表面は僅か約 2°C の温度上昇を示しているにすぎない．そうして，3 mm 表皮下では温度上昇すら行なわれていない．このことは，熱伝達によつて熱風から伝わつた熱量がミカンの温度上昇に使われており，且つ表面温度が湿球温度に達していないことから，(3) 式が全く使えないことを示している．このように，空気温度を上昇させて湿度をいかに下げても（約 30 %）その絶対温度は不変なのだから，ミカンの表面温度がそれに対応する湿球温度に上昇しない限り，水分蒸発の駆動力であるミカン表面の水分濃度と空気中の水分濃度（いずれもその絶対湿度に比例）の差（(2) 式）は大きくならず，乾燥速度は期待したほど大きくならない．

糸島におけるこの調査は，熱風によつてミカン温度が上昇するのを憂慮する関係者を安心させるために測定したデータであるが，このように考えてみれば，逆に温度が上昇しなければ，熱風乾燥の効果がないことを示している．

以上のことから，農産物の表面乾燥は熱と蒸気の同時移動であつて，且つ非定常であり，また被乾燥物体内部に温度勾配が存在する現象であることがわかる．これを方程式で示すためにいずれも妥当と考えられる次の仮定を設ける．

1) 被乾燥物内部の温度分布は，フーリェの熱伝導方程式[17]に従う．
2) 被乾燥物表面の蒸気圧は，表面温度に対応した飽和蒸気圧にある．
3) (1) 式で示される水分拡散速度の係数 R に関して，ルイズの関係[19]が適用される．
4) 熱伝達によつて伝わつた熱量は，蒸発の潜熱と被乾燥物の温度上昇の和に等しい．
5) 熱伝導は一次元で，被乾燥物を無限半平面と考えて適用する．
6) 農産物内部に等方一様性を仮定する．

これらの仮定のうち，1) ないし 4) は仮定というより，一般的な法則のようなものであつて，問題はないであろう．5) の仮定は，前述の測定でも明らかなように，温度上昇の深さが被乾燥物の径（夏みかんで 100 mm）に比し極めて浅いことからとつた仮定である．このことも了承されるであろう．最後の 6) の仮定は，自然農産物では正確に成立するものはないと考えられるが，計算を簡略化するために有効温度伝導率 (effective thermal diffusivity)[1] のようなものを考えて処理しているのが普通である．

さて，これらを式で表わしてみる．仮定 1) と 5) および 6) から

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\kappa\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{4}$$

が成立し，仮定 4) から (4) 式の境界条件として，

$$h(T_a-T)=k(H-H_a)\sigma-K\frac{\partial T}{\partial x},\quad x=0 \tag{5}$$

が得られる．この (5) 式の H は，仮定 2) によつて，表面温度すなわち T の $x=0$ における値だけの関数として与えられる．この関係式については後述する．h は熱伝達率であつて被乾燥物体の大きさ，形と風速によつて決まる．また R は仮定 2) から，h を空気の比熱で除することによつて得られる．この (5) 式の左辺は，熱伝達によつて熱風から被乾燥物体に表面を介して伝わる熱量であり，右辺第 1 項は，蒸発によつて失なわれる潜熱，第 2 項は熱伝導によつて被乾燥物体に入つていく熱量である．(4) 式を (5) 式について解くことによつて，被乾燥物内の温度分布，従つて表面温度が決定され，表面温度の関数として H が計算され，更にそれを積分することによつて乾燥量が決定される．フーリエの方程式である第 (4) 式については，種々の境界条件のもとで古くから解かれており，多くの解析解が存在するが，[2] この場合，H の非線形性のため解析解は不可能で，数値解によらざるを得ない．数値解法として，次節に示す差分法を用いた．

2. 数 値 解 法

(4) 式を差分化すると，よく知られているように，[6]

$$T_{i,j+1}=T_{i,j}+r(T_{i-1,j}-2T_{i,j}+T_{i+1,j}) \tag{6}$$

ここに

$$r=\kappa\Delta t/(\Delta x)^2 \tag{7}$$

である．この式は j に関する漸化式であつて，時間 t における各点 (x 座標) の温度が既知であれば，$t+\Delta t$ における温度分布を計算する．しかし，この式が適用できるためには x の範囲は有限でなければならないし，その両端，$x=0$ と $x=L$ において境界条件が示されていなければならない．

$x=0$ における境界条件は (5) 式で与えられ，その差分式として

$$h(T_a-T_{0,j})=k\{H(T_{0,j})-H_a\}\sigma-K(T_{-1,j}-T_{1,j})/2\Delta x \tag{8}$$

が得られる．これを T_a を基準にした温度に直して簡略化し，(6) 式の $i=0$ における式

$$T_{0,j+1}=T_{0,j}+r(T_{-1,j}-2T_{0,j}+T_{1,j}) \tag{9}$$

から，$T_{-1,j}$ を消去すると，

$$T_{0,j+1}=[1.0-2r\{h1(\Delta x)+1.0\}]T_{0,j}+2rT_{1,j}-2r(\Delta x)Q1 \tag{10}$$

が得られる．ここに

$$Q1=k\{H(T_{0,j}+T_a)-H_a\}\sigma/K \tag{11}$$

で，

$$h1=h/K \tag{12}$$

である．この (10) 式が計算上の $x=0$ における境界条件となる．次に L の決定と，その点における境界条件が必要になる．

この計算には，初期温度が一定で，温度の流体と表面 ($x=0$) で熱伝達を行なつている半無限体に関する熱伝導方程式の解[3]

$$\frac{T}{T_0}=\operatorname{erf}\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}+e^{h1x+h1^2\kappa t}\operatorname{erfc}\left\{\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}+h\sqrt{\kappa t}\right\} \tag{13}$$

を用いる．この式において，時間 $t=0.01667$ hr (1.0 min) にとり，x に 0, 2, 4, 6, 8, 10 mm の値を代入した値を Table 1 に示す．この表で明らかなように，6 mm 以下では (13) 式の左辺の値は 0.01 以下となり，1 %以下の影響があるに過ぎない．この値は，ここで論じている問題のように，表面で蒸発がある場合には更に小さくなる．従つて，計算上 6 mm を一方の境界と考え，境界条件として断熱を仮定してよいであろう．これは N を $x=L$ における番号として，断熱は

Table 1. Temperature effect to depth in 1 min.

depth (m)	$\frac{T_0-T}{T_0-T_a}$
0.000	0.061
0.002	0.029
0.004	0.012
0.006	0.004
0.008	0.001
0.010	0.000

$$T_{N-1,j}=T_{N+1,j} \tag{14}$$

で与えられるから，(9) 式から

$$T_{N,j+1}=T_{N,j}+2r(T_{N-1,j}-2T_{N,j}) \tag{15}$$

で与えられる．これが $x=L$ における計算上の境界条件となる．Table 1 の計算に必要な諸パラメータとして，熱特性については生鮮農産物の熱特性が水のそれに近いことから水のものを用い，熱伝達率に関しては球に関する次式[18] を用いた．また熱伝達率の計

算に必要な球の直径は 70 mm とし，風速は 1.0 m/sec とした．

$$Nu = 0.33Re^{0.6},\ 20 < Re < 315000 \qquad (16)$$

3. パラメータの計算式

3—1. 飽和蒸気圧[11]（p_{sat}）：飽和蒸気圧 p_{sat} と絶対温度 U の間には，

$$ln(p_{sat}) = -18.1973(373.16/U-1.0) + 5.02808ln(373.16/U) - 3.1813\times10^{-7} \cdot [\exp\{26.120525(1.0-U/373.16)\}-1.0] + 18.7265\times10^{-13}[\exp\{-8.039453(373.16/U-1.0)\}-1.0] \qquad (17)$$

の関係がある．

3—2. 蒸気濃度（H）：(17) 式で計算した蒸気圧より，絶対湿度が[12]

$$H' = 0.622p_{sat}/(1.0-p_{sat}) \qquad (18)$$

で計算され，

$$H = H'/r \qquad (19)$$

$$r = 0.28335\times10^{-2}\times(T+273.16)^{13} \qquad (20)$$

で計算される．乾燥空気中の蒸気濃度 H_a は非加熱時の気温に基づいて (17) 式より飽和蒸気圧を計算し，湿度（小数）を乗じ，その蒸気圧を計算し，(18) の p_{sat} に置きかえて H'_a を計算し，(20) 式の T には熱風温度を代入して (19) 式を H_a に関して計算すればよい．

3—3. 熱伝達率（h）：球や円筒のような簡単なものについては工学上多くの実験式が求められているが，

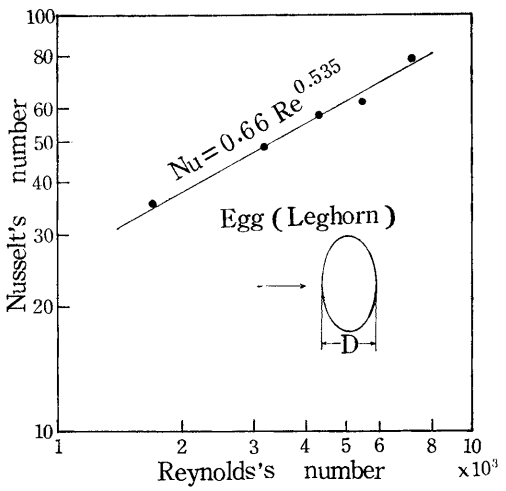


Fig. 2. Heat transfer data of a Leghorn egg.

農産物については著者らが求めた以外には見当らないようである．この研究で求めた鶏卵の場合の実験式を Fig. 2 と (21) 式に示す．また温州みかんの場合[5]について，(22) 式に示す．

〈鶏卵〉

$$Nu = 0.66Re^{0.535},\quad 1.8 < Re < 7000 \qquad (21)$$

〈みかん〉

$$Nu = 0.13Re^{0.65},\quad 0.9 < Re < 30000 \qquad (22)$$

3—4. その他：温度伝導率は，みかんについては 4.4×10^{-4}m²/hr,[9] 鶏卵については 4.88×10^{-4}m²/hr[4] である．

熱伝導率は，含水率から Siebel の式[14]を用いて比熱を計算し，先の温度伝導率から求めた．比熱は，ミカンでは 0.85 kcal/kg·°C，鶏卵では 0.79 kcal/kg·°C である．空気の比熱は，0.24 kcal/kg·°C とした．蒸発の潜熱は，

$$\sigma = 597.3-0.599T^{19} \qquad (23)$$

である．ちなみに，水についてこれらの値を求めると，20°C において，

K = 0.511 kcal/m·hr·°C
κ = 5.12×10^{-4}m²/hr
C_p = 0.999kcal/kg·°C

である．[23]

4. 実 験 方 法

実験では鶏卵を用いた．これは，著者らによつて既に温度伝導率が測定されていること，その熱的性質が水のそれに近く，他の農産物である果実，野菜類と同程度であること，表面が固く工学的測定の操作にたえること，また入手に簡単であること等による．

実験はまず，計算に必要な熱伝達率の測定を行ない実験式を作製し，次に実際の乾燥と測定を行なつた．

4—1. 熱伝達率の測定　もし加熱または冷却物体の内部に温度勾配が存在しないなら，その温度 T はその物体のどの位置で測定しても等しく，その温度変化は，加熱または冷却物体の温度 T_{air} を一定として，指数関数

$$\frac{T-T_a}{T_0-T_a} = \exp\{-(hS/WC_p)t\} \qquad (24)$$

に従う．[22] この式は半対数グラフ上で直線になるから，その直線の勾配から，$-(hS/WC_p)$ が求められ，

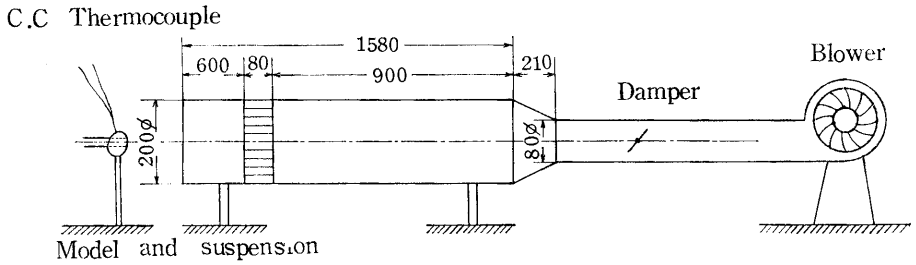


Fig. 3. Experimental aparatus of measuring heat transfer coefficient, and drying rate of farm products.

S, W および C が既知なら熱伝達率が求められる．しかし，この式の前提である温度の一様性は，鶏卵やミカンその他の農産物では温度伝導率が小さく形状が大きいために成立せず，この原理を応用して熱伝達率を求めることは出来ない．従つて，一般には，熱伝導率の大きい銅やアルミ等の金属を使つて模型を作り，測定する．しかし，これらについては極めて加工が困難なので，ここでは鉛を使用した．鉛は銅に比して熱伝導率が一桁小さいが，水に比して二桁大きく，この測定のレイノズル数の範囲（<8000）であればその誤差は0.6％に満たない．[5]

模型はセメントで型をとり，溶解した鉛をそそぎ込んで作つた．これを加熱し，**Fig. 3** に見られるような風洞の前において冷却し，内部の熱電対と平衡記録計をつないでその温度変化を連続記録し，熱伝達率を測定した．鶏卵の方向は，風速の方向がその軸に直角になるように置いた．その表面積 S は，透明ビニールテープをくまなく模型表面に貼りつけマジックインクを塗布し，それをセクションペーパにはりつけ，マジックインク部の面積を測定することによつて得た．鉛の比熱は，既知の測定結果[21]を利用した．必要なデータを並べると，

$$S = 0.4935\times10^{-2}\ \mathrm{m^2}$$
$$W = 0.3308\ \mathrm{kg}$$
$$C = 0.031\ \mathrm{kcal/kg\cdot{}^\circ C}$$

である．

測定された熱伝達率は，同時に測定されている風速との関係で

$$Nu = ARe^m \qquad (25)$$

の形に整理された．その結果は，第3節に示した．なお，この測定法の詳細については，著者らの文献を参照されたい．[5]

4—2. 鶏卵の表面乾燥と温度上昇の測定：鶏卵と風洞の相対位置は，**Fig. 3** に示した模型の場合と同じである．但しこの場合は模型の場合と逆に，風洞内で空気を加熱し熱風によつて鶏卵を加熱乾燥する．この熱風は，風洞内に置かれた 1 KW 炭化珪素発熱体によつて加熱される．風速は，被測定鶏卵と同位置に置かれた電子式熱線風速計（0～0.1 m/sec., 0～5 m/sec. F.S., 精度 2.5％）によつて行なう．加熱中の温度変化は，C-C 熱電対（0.1 mm, 1.5級）を **Fig. 4** に示す位置に瞬間接着剤で貼りつけ，これを3点式平衡記録計（5 mV F.S., 精度 0.5％）につないで記録した．表面水分の蒸発は，まず被測定鶏卵の重量を上皿直示天秤（容量 100 gr, 1目盛 0.01 gr）によつて測定し，次に霧吹きで表面に水滴が覆うようにし，さらに天秤によつて測定し，付着量を計算した．これらの秤量はいずれも，天秤への水分の付着を防ぐために，吊り下げて行ない，熱電対もとりつけた状態で測定した．

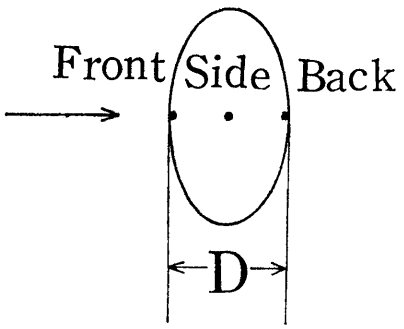


Fig. 4. Position of thermocouples on an egg.

さて，この水分量の連続的な変化量の測定は，その付着量が乾燥体の重量に比し，最大0.4％と極めて僅かで，風圧の外乱を受けて検出不能なため，各熱電対の位置を中心に全体を四分割し，各位置の水分が乾燥した状態を目測によつて判定し，その時間を記録した．測定終了後，再びその全重量を測定し，全体の水分蒸発量を測定した．各測定の条件すなわち付着水分

Table 2. Experimental condition.

	Heated air temperature* (°C)	Velocity (m/sec)	Drying up water** (g)	Natural air temperature* (°C)
Run 1	38.5 (27.0)	0.8	0.201	26.0 (24.2)
Run 2	71.0 (33.5)	0.8	0.147	26.0 (24.2)
Run 3	38.0 (28.6)	2.3	0.180	28.8 (26.5)
Run 4	51.5 (31.4)	2.3	0.198	28.8 (26.5)

* Wet bulb temperature in parentheses.
** The surface area is 0.006219 m².

量，風速，風温については，Table 2 に示す．

鶏卵はいずれも同一のものを使用した．その重量および表面積はそれぞれ

$$W = 0.052802\ \mathrm{kg}$$
$$S = 0.006219\ \mathrm{m}^2$$

で，表面積は，Romanoff ら[15]の標準鶏卵の重量と表面積（$W = 0.058$ kg, $S = 0.0068$ m²）から重量の 2/3 乗に比例する，として計算した．

5. 実験結果と理論計算値の比較

Fig. 5 に 4 種類の乾燥条件下における表面温度上昇の測定結果を示す．いずれも Front, Upper, Back の順で，温度上昇の率が大きくなつている．これは，局所熱伝達の相異を示すものであろう．

理論計算値は，初期条件を測定した鶏卵の初温を一様な初期温度として，(5) 式を境界条件として，(4) 式を解いたもので，図中に黒丸で示している．この理論値は，実測値をやや下回つている．この原因は後述するように多くあるが，最も大きいものは，(1) 乾燥の後期に，表面に乾部が拡大してきて，温度の急激な上昇がもたらされることによると考えられる．これは，実測値が熱風の湿球温度を越えていることからも明らかである．また，(2) 温度の測定が，最大風速部すなわち最大局所熱伝達部で行なわれたのに対して，使用した熱伝達率の式すなわち (21) 式が平均熱伝達率の式であること，更に，(3) 熱伝達率を測定するに当つて，鉛模型の原形である鶏卵が，実測鶏卵と異なることが考えられる．しかし，大体の一致を見ることが出来る．

Table 3. Experimental and theoretical drying up time.

	Drying up time (sec)			
	Experimental			Theoretical
	Front	Side	Back	
Run 1	120	240	300	320
Run 2	60	90	120	115
Run 3	75	100	110	115
Run 4	50	90	120	184

最も重要な乾燥速度については，測定値が乾燥終了時間によつて表現されているので，理論値も，付着水分が全部蒸発する時間を求めて，これと比較した．Table 3 には，鶏卵各部の乾燥時間と理論値が示されている．理論値は，実測値の平均よりいずれよりも大きい（すなわち，乾燥速度は小さい）．しかし，乾燥速度の最も小さい部分，すなわち Back の部分では Run 4 のものを除いてより一致がみられる．

理論値は平均的なものであるから，理論的にはこれが実測値の平均と一致するのが重要であるが，これが相異した原因としては，まず前述の理由による大きな表面の温度上昇が，(4) 表面水分の蒸気圧を大きくしたこと，その他，(5) 基礎方程式 (4) は熱定数の一様と等方を仮定しているが，これは理想的なもので実在の物体は近似的に成立するに過ぎず，鶏卵も，そのようなものの一つであること，(6) 鶏卵の熱定数の測定に誤差があること，(7) 付着水分の蒸気圧，蒸発の潜熱は，自由水のそれと相違すること等が考えられる．

なお，乾燥量の理論値については，Fig. 5 に黒三角印で示した．

このように，実測値と理論計算値に相違があり，その原因も明らかであるにもかかわらず，理論計算値は実測値を定性的によく説明し，且つ定量的にも 20～30 %程度の誤差があるに過ぎない．しかも実際的には 1 個全体の乾燥時間は，その最も乾燥速度の小さな部分に支配されると考えると，この理論値は鶏卵 1 個全体の表面乾燥終了時間をよく表わしているのである．

いずれにせよ，その誤差は 20～30 %にとどまるであろうから，乾燥の推定計算に用い，風量や熱源の容量をきめる式として充分利用出来ると考えられる．装置の風量や熱源の調整は，この程度であれば充分に可能だからである．しかも，この式は極めて一般的で，対象とする農産物熱伝達率や熱定数が不明な場合に

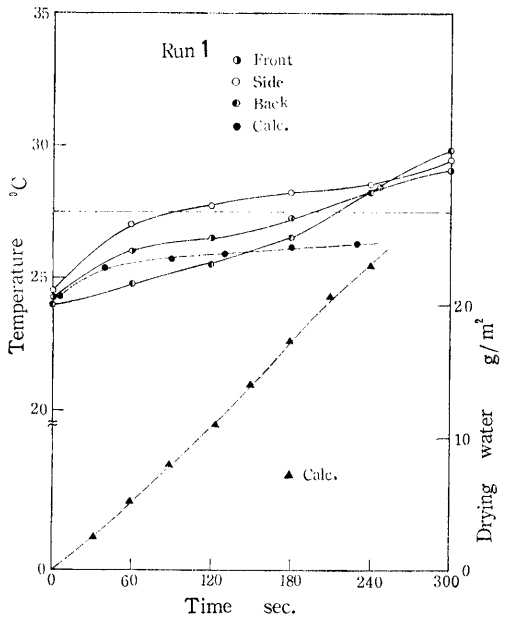


Fig. 5-1.

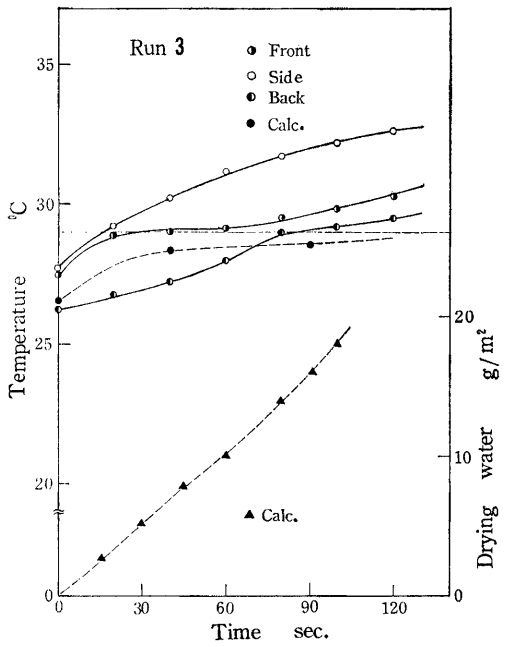


Fig. 5-3.

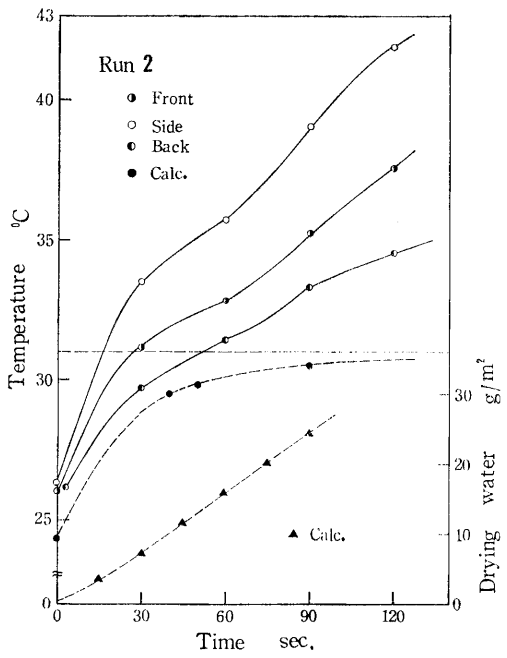


Fig. 5-2.

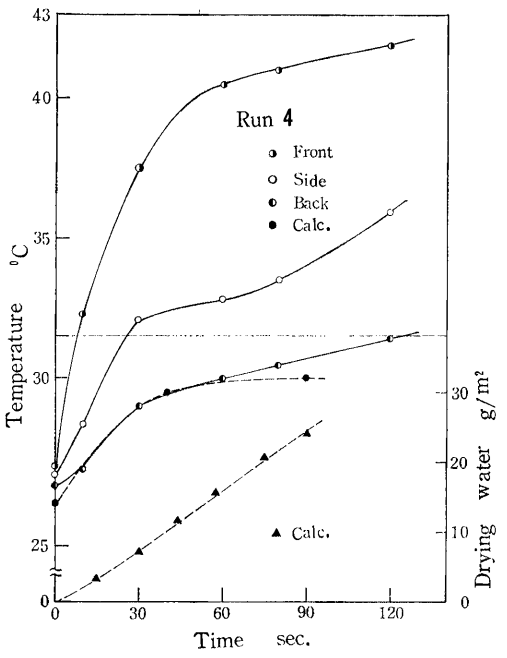


Fig. 5-4.

Fig. 5. Experimental and theoretical temperature rising on the surface of an egg, and theoretical amount of drying water.

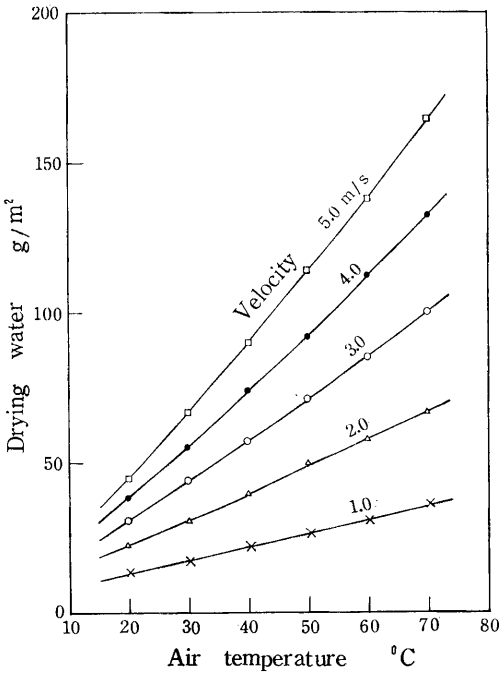


Fig. 6. Theoretical relationship between drying conditions and drying water of Citrus Unshu assuming a constant drying area.

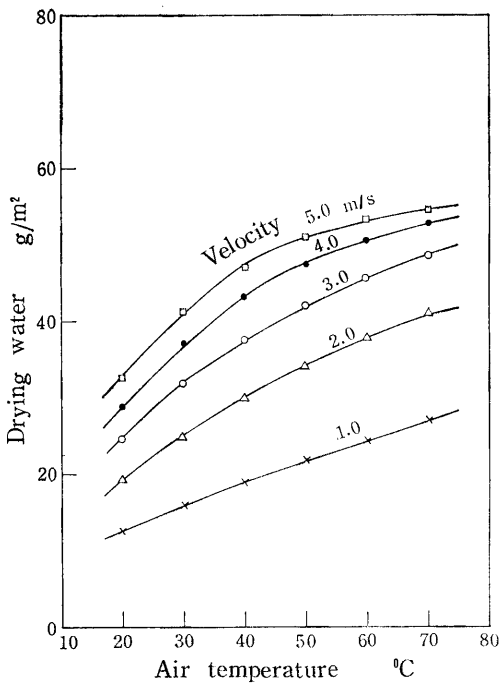


Fig. 7. Theoretical relationship between drying conditions and drying water of Citrus Unshu assuming a proportional reduction of drying area to the remained surface water.

は，球や円筒に関する熱伝達の式や水の熱定数を用いて，大体の推定をすることが出来る．

Fig. 6 は温州ミカンについて，乾燥時間1分を仮定し，風量と熱風温度と表面蒸発量の関係を示したものである．時間1分は，現行の選果機における熱風乾燥部の時間が1分なることによつたものである．次の常温乾燥部の乾燥が冷却で，これと対照的な乾燥を予想されるから，この区間の乾燥は50％で充分である．**Fig. 6** と **Fig. 7** の相違は，**Fig. 6** が一様な表面乾燥を仮定しているのに対し，**Fig. 7** は，表面付着水分の面積が残留水分に比例するとしたものである．このような考えは，一般乾燥における恒率乾燥と減率乾燥第一段の関係に一致するが，その限界の判定は極めて困難で，この場合両方の計算を示した．実際はこの中間であろう．装置設計上は，後者が安全側にある．

6. 要　　約

農産物洗滌後の表面乾燥は，鮮度維持の面から，また装置の大きさの制約から，その全体を昇温させることなく，極めて短時間に行なわなければならないため，その乾燥期間は予熱乾燥期間に属し，且つ，農産物の表面と内部に大きな温度勾配の存在する特殊な乾燥であつて，普通一般に用いられている乾燥計算式では，これを処理することが出来ない．

この研究では，半無限体に関する熱伝導の方程式を，表面蒸発と熱伝達が同時に行なわれる境界条件について解く計算値を提供し，鶏卵による実測結果と比較して，それが充分に装置設計上利用できることを確かめた．また，それに基づいて，温州ミカンに関する計算表を作製した．

謝辞：実験および作図作成に協力された堀善昭氏，佐野道子嬢に感謝します．

Nomenclature

A,m : constants in Eq. (25)
Cp : specific heat (kcal/kg·°C)
erf(z) : error function
erfc(z) : defined by 1-erf (z)
H : concentration of vapor of drying surface

(kg/m³)
H' : absolute humidity (kg/kg')
Ha : concentration of vapor in air (kg/kg')
h : heat transfer coefficient (kacal/m³hr)
h1 : relative heat transfer coefficient defined by Eq (12) (m^{-1})
K : thermal conductivity (kcal/m·hr·°C)
k : mass transfer coefficient for concentration (kcal·m/kg·hr)
k' : mass transfer coefficient for pressure (kcal/m·²hr·mmHg)
L : depth of the point over which there is no temperature effect of the surface temperature change (m)
Nu : Nusselt number (—)
p : vapor pressure of surface water (mmHg)
p_a : partial vapor pressure in air (mmHg)
p_{sat} : saturated vapor pressure (mmHg)
Q1 : defined by Eq. (11) (°C/m)
Re : Reynolds number (—)
r : defined by Eq. (7) (—)
S : area of heat transfer and evaporation surface (m^2)
T : temperature of product (°C)
T_a : temperature of air (°C)
$T_{i,j}$: temperature at regular intervals $x = i \cdot x$ and $t = i \cdot t$ (°C)
T_S : temperature of drying surface (°C)
T_0 : initial temperature of drying product (°C)
t : time (hr)
U : absolute temperature of vapor (°K)
X : cordinate in the direction of inward nolmal of drying surface (m)
W : mass of solid (kg)
w : mass of surface water (kg)
Δ : prefix, indicate finite increment
η : thermal diffusivity (m^2/hr)
σ : latent heat of water evaporation (kcal/kg)

文　献

1) Bennett, A. H. (1964): Precooling Fruits and Vegetables, Trans. ASAE 7: (3) 265-266, 270.
2) Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger (1959): Conduction of Heat in Solid, 2nd ed., Oxford Univ. Press, London, 510 pp.
3) ibid., p. 71.
4) 中馬 豊, 村田 敏, 内田 進 (1968): パラフィン模型による任意形状農産物の有効温度伝導率の測定について. 農機誌 30: (2) 100-105.
5) 中馬 豊, 村田 敏, 内田 進 (1970): 農産物の熱伝達率の測定. 農機誌31: (4) 298-302.
6) 藤川洋一郎 訳 (1971): G. D. スミス電算機による偏微分方程式の解法, サイエンス社. 東京, p. 11.
7) 藤田重文 (1956): 化学工学 I. 岩波書店. 東京, p. 247.
8) ibid., p. 250.
9) 石橋貞人, 小島孝之 (1967): 農産物の冷却速度 (第2報): 農機誌 29: (2) 92-97, 114.
10) 森野一高, 矢吹万寿, 堂腰 純, 細川 明, 相原良安 (1969): 農業施設学. 朝倉書店, 東京, 付録.
11) 守安虎次 (1964): 空気調整工学 5th ed., 技報堂, 東京, p. 29.
12) ibid., p. 15.
13) ibid., p.10.
14) Richey, C. V. ed. (1961): Agricultural Engineers' Handbook, McGraw Hill, New York, p.746.
15) Romanoff, A. L. and A. J. Romanoff (1949): The Avian Egg, John Wiley and Sons, New York, p. 105.
16) 東京天文台 (1962): 理科年表, 丸善, 東京, 気 8.
17) 坪内為雄, 加藤清雄訳 (1963): グレーベル・エルク・グルグル熱伝達の基礎, 朝倉書店, 東京, p. 7.
18) ibid., p. 268.
19) 内田秀雄 (1965): 湿り空気と冷却塔, 裳華房, 東京, p. 7.
20) 山田治夫 (1964): 冷凍および空気調和. 養賢堂. 東京, p. 219.
21) 横堀 進, 久我修訳 (1960): ギート基礎伝熱工学, 丸善. 東京, p. 325.
22) ibid., p. 250.
23) ibid., p. 325.

Summary

The drying process of the surface water of the fresh farm products after the washing belongs to the preheating period for the quick drying to prevent a temperature rising of the product for keeping freshness, and for increasing efficiency. Therefore the drying rate can not be estimated by the formula of constant rate period, and the falling rate period. The process is transient simultaneous mass and heat transfer

phenomena, and the complication and difficulty are increased by the existence of the temperature gradient in the product.

For the purpose of dealing with this problem the equation of conduction of heat in semi-infinite solid with the boundary condition expressing the fact that the summation of the heat of the evaporation and the heat of the conduction into the solid is equal to the heat transfered to the surface by convection from the heated air, which is expressed in Eq. (4) and Eq. (5), is proposed in this paper.

The equation is solved by Runge-Kutta method assuming the effective thickness which is determined by the analytical solution of the equation of semi-infinite body with the boundary condition of the heat convection only between the surface and the air.

The experiment is performed using an egg on the surface temperature and the drying rate of the surface water. The suface temperature is measured by C-C thermocouples with a three pen recorder, and the drying rate is measured as the dry up time of the four divided parts on the surface with the eye because the mass of the water is so little comparing with the mass of the product that precise continuous measurement of the change of the mass of the water is very difficult. The empirical equation of the heat transfer of the egg is determined from the cooling curves of the lead model of an egg.

The theoretical results on temperature agree well with the experimental results, and on drying up time agree well with the experimental results, too.

It may be concluded that the theory is useful for the estimation of the drying rate and the temperature rise of the drying surface of the wet fresh farm products after the washing with the object of designing and opaerating the dryer.