

薄層理論による粳の混合層乾燥特性の解析

村田, 敏
九州大学農学部農産機械工学教室

<https://doi.org/10.15017/23145>

出版情報：九州大学農学部学藝雑誌. 27 (3/4), pp.259-280, 1973-07. 九州大学農学部
バージョン：
権利関係：



薄層理論による粃の混合層乾燥特性の解析

村 田 敏
九州大学農学部農産機械工学教室
(1973年3月12日受理)

An Application of Thin-Layer-Drying Theory to Predicting Grain Moisture and Temperature Changes in a Mixing Bed of Rough Rice

SATOSHI MURATA

Laboratory of Agricultural Process Engineering,
Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka

薄層における乾燥理論を用いて堆積層の乾燥特性を解析した例として、まず渡辺・清水 (1951) があり、最近では Boyce (1965), Henderson (1968) 及び Spencer (1969) がある。これらによつて、堆積層をなす穀類の乾燥計算法はまだいろいろ改良すべき余地を残しているにせよ、実際の問題に役に立ち得る段階に来ているように考えられる。しかし、堆積層の状態で乾燥する方式には、高速乾燥の場合に乾燥むらを生ずる欠点があり、最近我が国で各地に建設されつつあるライスセンタやカントリーエレベータなどの大規模乾燥装置では、混合乾燥法が普及しつつある。

この混合乾燥法は何らかの方法で穀類を攪拌しながら風を通過させて乾燥するもので、流動層乾燥もその一つにあたるが、理論的に乾燥むらを生じない利点を持つている。これは穀物の大規模高速乾燥にとつて極めて有利な点であるが、乾燥方式が新しいせいか、堆積層の乾燥計算法については、極めて多くの研究論文が発表されているのに対して、混合層のものについては皆無に近い状態である。

この研究は、混合層における乾燥計算法に関する一つの提案である。基本的には堆積層においてなされていると同様、穀物薄層の乾燥特性に基礎をおき、混合層を薄層に分割して考える乾燥計算法である。しかし、ここで定義する混合層の性質と関連づけることによつて、その具体的計算法は堆積層の場合と異なつたものとなる。また、この原理は混合層乾燥を行なうすべての材料に適用されるが、ここでは特に粃の乾燥特性に基礎をおき、具体的に計算法を示す。

本研究の応用計算例の基礎資料を快く提供下された東京教育大学教授森野一高先生に心より御礼申し上げる。また、本報告の製図および浄書に協力下された技官堀善昭氏および佐野道子氏に謝意を表する。

1. 粃の薄層理論

粃の薄層理論はこの計算法の基礎となるので、次のような考察と説明を加える。

1-1. 乾燥特性の選択

物質の典型的な乾燥は、まず物質が加熱媒体（一般に空気）と熱平衡に達するまでの予熱乾燥期間を経て、乾燥速度と物質温度の一定な恒率乾燥期間を通り、含水率の減少と共に乾燥速度の低下する減率乾燥期間に入り、遂には平衡含水率にその含水率が漸近して、乾燥を停止する経過をたどる。これらの乾燥期間は予熱乾燥期間を除いて含水率によつてきまり、粃については、実際の乾燥における初期含水率が、コンバインによる生脱穀の場合でも 25% を超えない (岡村・渡辺, 1969) ことからその乾燥が減率乾燥期間にある (山沢ら, 1971) ことは確実であろう。しかし、この減率期間が第一段であるか第二段であるか (藤田, 1956) は確実にわかつていない。

このことについて、前記の渡辺・清水 (1951) は第一段の立場をとり、Boyce (1965) 以後は第二段の立場をとつている。この選択は極めて重大である。何故なら、前者は乾燥速度が表面水分の蒸発に支配される現象であり、後者は乾燥速度が粒子内部における水分の拡散速度に支配される現象であつて、乾燥の基礎方

程式は似ていても、そのパラメータの表示法は根本的に異なり、乾燥計算に関する考え方があらゆる面で異なってくるからである。この厳密な判定は、粒子内の水分分布の変動を直接測定してみればわかる。しかし、粉粒のような小さな物質では現在の測定技術では無理であつて、現在までに穀粒でこのような測定を行なつた例はない。しかし、乾燥曲線や間接的な現象から、どちらを選択した方がより合理的で且つ計算に有利であるかはわかる。

この研究では次の三つの理由から、減率第二段を粒の乾燥特性として選択することとした。

1) 一般の穀物の乾燥における時間-自由含水率¹⁾の関係は自由含水率を対数軸にとつた半対数グラフ上で直線となることが知られている。

これは、減率第一段でも第二段でも理論的に説明することが出来る。しかし粉の場合、乾燥曲線はその初期の部分は直線からはずれている。これは減率第一段としたのでは説明困難であるが、減率第二段であれば、拡散方程式のフーリエ級数解の初期における第二項以下の項の影響として説明することが出来る。

2) 粉の乾燥速度は風速の影響をほとんど受けない。これが、恒温槽内での薄層または単粒の乾燥試験結果を通風時の堆積層の計算にそのまま利用出来る所以である。前記の渡辺・清水 (1951) も粉の乾燥速度係数が風速の影響を受けないことを示している。このことは第二段説に有利である。なんとすれば、表面水分の蒸発が支配的な第一段では境界層における風の影響を無視することは出来ないが、内部拡散の支配的な第二段では風の影響は理論的にないからである。

3) Henderson and Pabis (1961) によつて、穀物の乾燥速度係数は拡散係数によつて表わされ、また温度の影響が Arrhenius 式によつて合理的に表示される。また、拡散問題については、拡散の数学と熱伝導論で多くの理論的成果や実験結果が整備されて研究上有利である。

以上の理由による選択は現象論的且つ便宜的なものであるから、実際の乾燥機構はこの逆かもしれないし、また全然別個のものであるかもしれない。しかし、工学的にはこのような立場は許されると考える。

1—2. 基礎方程式 (1) ——乾燥速度——

減率第二段の乾燥機構は水分の内部拡散に支配され、その水分分布は熱伝導の方程式と同じ形式の拡散の方程式によつて書き表わされるとする。また、境界

条件は、表面が周囲の空気の湿度および温度でできる平衡含水率にあるとする。一般に、穀類はあらゆる物理性に関して非等方・非等質と考えられるが、簡単のため、前記のすべての研究者がそうであつたように、等方・等質で且つ時間に関しても物理常数の変化はないものとする。

さて、このような拡散方程式は、単位体積中にある拡散物質（この場合、水）の質量で示される濃度に関して書き表わされており、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

となるが (Crank, 1964), 被拡散物質 (溶媒。この場合は穀類の乾物) が伸縮しないと考へた場合の密度を ρ として

$$M = C/\rho \quad (2)$$

とおけば、 M は小数で表わした乾量基準含水率となり、(1) 式を ρ で両辺除することによつて、

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

が得られる。これは、 M に関して Eq. (1) と全く同じ形式であり、乾量基準含水率を考える限り拡散の方程式にしたがう。

境界条件は、表面が平衡含水率に保たれると考えるから、

$$M = M_e, (x, y, z) \in S \quad (4)$$

である。また簡単のために

$$m = M - M_e \quad (5)$$

とおけば、 m は自由含水率で Eq. (3), Eq. (4) は

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 m}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$m = 0, (x, y, z) \in S \quad (7)$$

となる。

さて、Eq. (6) を時間だけの関数 TT と位置ベクトル (x, y, z) だけの関数 E とで変数分離すれば、 $-\lambda^2$ を固有値として、

$$TT = \exp(-\lambda^2 D t) \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \lambda^2 E = 0 \quad (9)$$

が得られる。この固有値 λ は Eq. (9) が Eq. (7) の境界条件を決定するように、すなわち

$$m = TT \cdot E \quad (10)$$

1) 含水率から平衡含水率を引いたもの。

が成立することから

$$E = 0, (x, y, z) \in S \quad (11)$$

を満足するように決定する。

この Eq. (9) と Eq. (11) には物性定数が全く関与しておらず、ただ Eq. (11) が表面 S を規定しているから、 λ は幾何学的形状だけによつてきまる。また l を代表長さとし、

$$\left. \begin{aligned} x &= lx' \\ y &= ly' \\ z &= lz' \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

と座標を拡大 (縮小) して、Eq. (9)、Eq. (11) は、

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z'^2} + (\lambda l)^2 E = 0 \quad (9')$$

$$E = 0, (x', y', z') \in S' \quad (11')$$

と変換され、 $(\lambda l)^2$ は不変に保たれる。これは相似形の場合に (λl) が一定に保たれることを意味する。さて、この固有値 λ は一般に無限に多くの値を有するが、簡単な形状である球、円筒、立方体についてわかつておりその最小値 (Crank, 1964) は、

$$\begin{aligned} \lambda l &= \pi = 3.1415 \dots (\text{球}, l = \text{半径}) \\ &= 2.4048 \dots (\text{無限円筒}, l = \text{半径}) \\ &= \pi = 3.1415 \dots (\text{無限平板}, l = \text{厚さ}) \\ &= \sqrt{3} \pi = 5.4414 \dots (\text{立方体}, l = \text{一辺長}) \end{aligned}$$

である。また Smith *et al.* (1967) の Geometry Index を用いれば、一般楕円体の場合これを

$$\lambda l = \sqrt{GI} \pi = \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{3l^2}{8a^2} + \frac{3l^2}{8b^2}} \pi \quad (14)$$

なる近似式で表わすことが出来る。

さて、この固有値を用いて Eq. (6) の解は、

$$m = \sum_{i=1}^{\infty} A_i E_i \exp(-D \lambda_i^2 t) \quad (15)$$

で表わされる。この E_i は固定値 λ_i に対応する Eq. (9) の解である固有関数で、Green の定理で証明されるように直交関数系をなし、係数 A_i は初期条件によつてきまる。

この初期条件は、実際には穀粒内の水分分布についての正確な測定結果がないので不明であるが、小粒子であるから、あまり変異はないと考えて一様とみなし

$$m = M_0 - M_e = m_0 \quad (16)$$

とする。

また、実際に我々が用いている含水率というのは粒子の平均含水率を指しているのので、Eq. (15) を $x, y,$

z について積分し、平均的な含水率として

$$m/m_0 = \sum_{i=1}^{\infty} B_i \exp(-D \lambda_i^2 t) \quad (17)$$

を用いる。Eq. (17) 中の λ_i は大きさの順にとつてあるので、 t が大きくなつた段階では、第 2 項以下は急速に小さくなり無視することが出来る。したがつてある程度時間が大きくなつた段階では

$$m/m_0 = B_1 \exp(-D \lambda_1^2 t) \quad (18)$$

で表わされる。すなわち、半対数グラフ上に時間と含水率をとつたときにその関数は直線となる。Henderson and Pabis (1961) は球の熱伝導方程式の解を用いて、このことをトウモロコシの乾燥曲線について説明している。この B_1 は、簡単な幾何学的なものについては (Crank, 1964)

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= \frac{6}{\pi^2} = 0.608 \text{ (球)} \\ &= \frac{4}{(l \lambda_1)^2} = 0.692 \text{ (無限円筒)} \\ &= \frac{8}{\pi^2} = 0.811 \text{ (無限平板)} \\ &= \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 = 0.533 \text{ (立方体)} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

である。この例にあるように、 B_1 は形だけによつてきまる無次元の値である。したがつて穀粒に固有な値としてきまると考えられる。穀粒の形状はきわめて複雑だから、実際には実験によつてきめるのが適当であろう。

さて、Boyce (1965) は球を仮定し、(11) 式を基礎式として大麦堆積層の乾燥を解析した。しかし、前述の説明で明らかのように、この Eq. (18) は時間の大きくなつた段階での近似式であつて、時間の小さな段階では誤差を生じる。例えば、 $t = 0$ では、左辺の値は B_1 となるが、右辺は $t = 0$ で $m = m_0$ だから、1 となり、等式は成立せず、その差が誤差となつて表われる。球の場合は前述したように、 $B_1 = 0.608$ であつて約 40% の誤差を生じる。この点に関して、Henderson (1968) は rice について平板を仮定し、級数の第二項までとつてこの計算を行なつた。すなわち、

$$K = D \lambda^2 \quad (20)$$

として

$$\frac{\partial m}{\partial t} = K m \left(\frac{\exp(-K \theta) + \exp(-9K \theta)}{\exp(-K \theta) + (1/9) \exp(-9K \theta)} \right) \quad (21)$$

をその基礎計算式とした。この近似の程度は、たしか

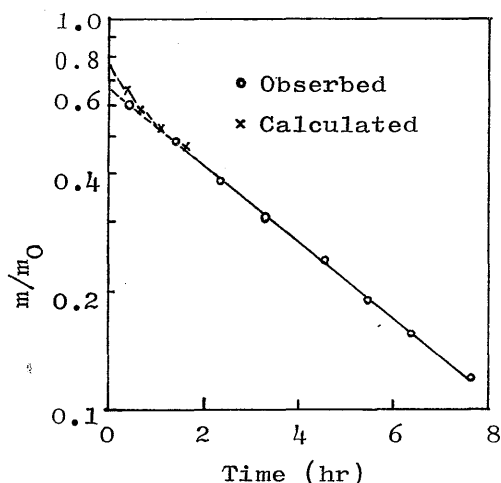


Fig. 1. Drying history of a thin layer of rice (After Henderson *et al.*, 1968).

に Eq. (18) より高い。しかし、 $B_1 + B_2 = 0.901$ となり、やはり 10% 程度の誤差を生じる。なお、その際 Fig. 1 に見るように、 K 及び B_1 は実験データに適合するようにきめており、 $B_1 = 0.650 m_0$ となっている。これは無限平板における理論値 $B_1 = 0.811 m_0$ と大きく変異しており、むしろ $B_1 = 0.608$ の球に近い値であつて、理論的な矛盾を含む。Spencer (1969) は、時間の大きい場合は Eq. (18) を用い、時間の小さい場合はフーリエ級数解でなく、時間の小さい場合に収れんの早い級数解の第一項を用いて、大麦と小麦の堆積層に関する Woodforde and Lawton (1965) 及び Clark and Lamond (1968, 1969) のデータを解析した。この基礎式は Becker (1959) の解析した小麦単粒に関する成果を利用したものである。

さて、時間の小さい場合に収れんの早い解は誤差関数系統の級数によって表わされ（主としてラプラス変換の解法による）、第一項近似は、

$$F_0 = Dt/l^2 \quad (22)$$

として、

$$\left. \begin{aligned} m/m_0 &= 1 - \frac{6}{\sqrt{\pi}} \sqrt{F_0} + 3F_0 \quad (\text{球, } l = \text{半径}) \\ &= 1 - \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{F_0} \quad (\text{無限円筒, } l = \text{半径}) \\ &= 1 - \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{F_0} + \frac{8}{\sqrt{\pi}} F_0 \cdot \exp\left(-\frac{1}{4F_0}\right) \\ &\quad (\text{無限平板, } l = \text{厚さ}) \\ &= 1 - \frac{12}{\sqrt{\pi}} \sqrt{F_0} \quad (\text{立方体, } l = \text{一辺長}) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

となる。

Becker (1965) は Eq. (18) の代りに

$$Z = \frac{S}{V} \sqrt{Dt} \quad (24)$$

とおいて、

$$m/m_0 = \frac{\alpha}{\beta^2} \exp(-\beta^2 Z^2) \quad (25)$$

を用いた。このような α , β の二つのパラメータによる係数の分離は、Eq. (18) の B_1 が幾何学的なものだけで決定され、また指数部の時間の係数 $-D\lambda^2$ が物性的なもの（拡散係数）と幾何学的なもの積で決定されることから正しいが、本質的にも実用的に言っても Eq. (18) をそのまま用いることと何ら変わりのないものである。

また、Becker は Eq. (23) の一般化として

$$m/m_0 = f(Z) \quad (26)$$

として

$$m/m_0 = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} Z + \frac{f''(0)}{2!} Z^2 \quad (27)$$

を考えた。このような表現は、Eq. (23) の第二項までからの類推から正しいと思われる。実際、 V/S に関して

$$\left. \begin{aligned} V/S &= 3/l \quad (\text{球, } l = \text{半径}) \\ &= 2/l \quad (\text{円柱, } l = \text{半径}) \\ &= 2/l \quad (\text{平板, } l = \text{厚さ}) \\ &= 6/l \quad (\text{立方体, } l = \text{一辺長}) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

であつて、Eq. (27) と Eq. (23) は第二項まで完全に一致する。任意形状のものについての数学的証明は出来ないが、任意形状のものについても少なくとも実用上正確な表現が出来るものと考えられる。 $f''(0)$ については、曲線のあてはめからこれを決定している。Becker は小麦について $\alpha = 0.862$, $\beta^2 = 1.300$, $\alpha/\beta^2 = 0.663$, $f''(0) = 0.588$, $V/S = 0.0453 \text{ cm}$, $V/S = 0.0515 \text{ cm}$ (crease 除去) を算出している。ただし、Becker (1959) の研究は真空下での乾燥を測定解析したもので、平衡含水率でなく表面含水率とこれを定義している。Spencer (1969) はこの結果をそのまま利用しているため、表面含水率として常数 $M_s = 0.11$ を用いている。これは、真空下での平衡含水率であろう。もしこのような式を基礎式に用いるならば、単粒であろうと、堆積層であろうと、混合層であろうと、乾燥曲線はすべて 11% に近づいていく。しかし実際にはそうではなく、大気温度及び湿度できまる平衡含水率に近づくであろう。

さて、ここで用いる基礎方程式は、今まで述べた中で最も合理的で矛盾のない Becker の式を用いる。ただし、表面含水率を平衡含水率とし、したがって Spencer (1969) のようにこれを一定としない。また、 $f''(0)$ の決定は Eq. (27) を曲線の初期の部分にあてはめて決定するのではなく、Eq. (25) と Eq. (27) が滑らかに接続するように決定する。そうしてその接続点を、これら二つの近似式の境界点とする。Spencer (1969) は、 $X = 0.75$ を接続点としているが、この点では接続が滑らかでない。これらを整理して式で表現すれば、次のようになる。

$$m/m_0 = \frac{\alpha}{\beta^2} \exp(-\beta^2 Z^2), \quad Z > Z_b \quad (25)$$

$$m/m_0 = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} Z + r Z^2, \quad Z \leq Z_b \quad (27')$$

$$Z = \frac{a_v}{1-f} \sqrt{Dt} \quad (24)$$

ただし、 r と Z_b は

$$\left. \begin{aligned} \frac{\alpha}{\beta^2} \exp(-\beta^2 Z_b^2) &= 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} Z_b + r Z_b^2 \\ -2\alpha Z_b \exp(-\beta^2 Z_b^2) &= -\frac{2}{\sqrt{\pi}} + 2r Z_b \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

を満足するように決める。(24) 式は

$$\frac{S}{V} = \frac{a_v}{1-f} \quad (30)$$

なる関係式を用いて、堆積層まれた混合層で用いる記号で表現したものである。

1-3. 基礎方程式 (2) —— 穀粒温度 ——

前項の基礎方程式には熱伝達に関するものがない。これは大気中の温度が一定であり、粒の温度はこれと平衡状態にあり、また大気中の温度も一定と考えているからである。しかし、堆積層や混合層を通過する大気中の温度と湿度は時間的にも位置的にも変動しており、このような状態における乾燥に薄層理論を適用するためには、大気中の温度と湿度及び粒自身の温度を推定する方法がなければならない。さもないとこれらの関数である水分拡散係数や平衡含水率が推定出来ず、したがって乾燥速度を計算することが出来ない。

この場合最も簡便な方法は、通過大気中のエンタルピすなわち総熱量²⁾を一定と仮定することである。これは大気中の等エンタルピ線が等湿球温度線にほとんど一致することから、湿球温度一定を仮定することと同じ

である。またこの仮定は、粒に与えられた熱がすべて蒸発の潜熱にかわるものと仮定することに等しい。何故ならば、水蒸気がすべて通過大気に吸収されるために通過大気が粒に与えた熱量はすべて水蒸気中の潜熱の形で再び大気中に吸収されて戻り、大気中の総熱量は不変に保たれるからである。

このエンタルピは大気中の温度と絶対湿度の関数であるから、これを一定にすることにより、大気中の湿度か温度の一方がわかれば他の一方を計算することが出来る。したがって前節の式によつて乾燥速度を計算し、これから通過大気中の絶対湿度の増加を計算し、温度の変動を計算できる。この考え方には熱伝達率は不要であり、大気温度と粒子温度は平衡状態にあると考え、粒子温度と大気温度の区別は考えない。

このような考え方に立つて薄層理論を堆積層の解析に利用したのは、前記の渡辺・清水 (1951) 及び Henderson (1968) である。このような考え方は、乾燥が極めてゆっくりしており、通過空気中の温度と粒子の温度が準平衡的な変化を辿る場合には適切な過程と考えられる。この場合にも初期の部分で粒子と風温が平衡に達するまでの過渡的な期間があるが、これは全体の乾燥期間に比し極めて小さく、これを予熱乾燥期間 (藤田, 1956) と言っている。

さて、現在大型乾燥施設で行われているいわゆるテンパリング (Richey, 1961) 乾燥では、従来の堆積層 (厚い層) の乾燥に用いていた熱風温度が 35°C 以下に限定されていたのに対して、60°C 程度のものを用い、かつ、一回の乾燥期間が極めて小さい。このような場合には初期初温と熱風温度の差が大きいためにそれらが平衡する期間は長く、一方全体の乾燥期間が短かいから乾燥全体にとつて予熱期間の占める割合が大きくなり、これを従来通り無視して考える訳にはいかなくなる。

さて、この予熱期間ではエンタルピ一定の原則は通用しない。何故ならば、通過大気中の熱量は水分の蒸発だけに使われるのではなく、粒子の温度の上昇に用いられ、この分だけ大気中の熱量は減少するからである。そこで、エンタルピ一定の仮定に代わつて別の方程式が必要となる。それは熱伝達に関するもので、それを導くには風温と粒温を別に考えることと、熱伝達率を導入することが必要である。ここでは、前節の式に熱伝達を考慮したものを書き加える。すなわち、熱風によつて粒子に加えられた熱量は粒の温度上昇と水

2) 等圧下では、エンタルピは総熱量に一致する。

分の蒸発に消費されるとし

$$c_s \rho_s (1-f) \frac{dT_s}{dt} - \sigma \rho_s (1-f) \frac{dm}{dt} = h a_v (T_g - T_s) \quad (31)$$

を導入する。前記 Boyce (1965) と Spencer (1969) は、堆積層の解析にこのような熱伝達に関する方程式を導入した。Boyce (1965) は、前節に示した含水率に関する解 Eq. (25) をこの Eq. (31) に代入して、粒子温度に関する解を求めている。この解によつて、粒子の温度上昇の様子が近似的に計算出来る。明らかに、この解は乾燥速度に関してこの温度上昇の影響を受けない。それは、粒子温度が一定に保たれるとした減率第二段の解をそのまま用いていることによる。これは減率第二段を示す穀物においては、温度変化が行なわれている際にも、乾燥速度に関しては全く同じ法則に支配されると考える限り正しい。この研究においても、この立場をとる。ただし、拡散係数は粒子温度の関数であつて温度が変動すれば変動するのであるから、この場合のように温度の変動を前提とした解析では、拡散係数を一定として得られる Eq. (25) をそのまま用いるのは矛盾している。しかし極めて時間を小さくとつた場合には温度の変動も小さいから、この式は成立するはずである。

1-4. 基礎方程式の一般化

外気条件を一定とし、乾燥速度に関する諸パラメータを一定として得られる Eq. (25) または Eq. (27) のような解が、パラメータが変動する場合にもそのままの形で利用出来るためには、任意の t における含水率またはその他のパラメータ値を初期値とし、その Δt 後における値がその解によつて計算出来なければならない。含水率の場合であれば、

$$\frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} = f(t) \quad (32)$$

とするなら、

$$\frac{M(t + \Delta t) - M_e(t)}{M(t) - M_e(t)} = f(\Delta t) \quad (33)$$

が成立しなくてはならない。これは、 Δt 後の値が Δt と $M(t)$ および $M_e(t)$ だけによつて決まり、それまでの時間の経過に関係ないことを意味する。さて、Eq. (33) は

$$M(t + \Delta t) - M(t) = \{M(t) - M_e(t)\} \{f(0) + f'(0)\Delta t - 1\} \quad (34)$$

と変形されるから、 $\Delta t \rightarrow dt$ における連続性より

$$f(0) = 1 \quad (35)$$

の必要条件が導びかれる。これによつて、Eq. (25) すなわち減率第二段の標準解は不合格になる。次に、Eq. (35) が成立するとして、Eq. (34) は、

$$dM = (M - M_e) f'(0) dt \quad (36)$$

となり、 $f'(0)$ は定数だからこれを解き

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(f'(0)t) \quad (37)$$

が得られる。すなわち、

$$f(t) = \exp(f'(0)t) \quad (38)$$

が成立しなくてはならない。これによつて Eq. (27') も不合格となる。結局このような条件に適合するのは、減率第一段のときのみであることがわかる。したがつて、Eq. (25)、Eq. (27') をこの研究で必要とするようなパラメータの変動する場合に利用するためには、もつと一般的な形に表現する必要がある。完全に正確な表現をするためには、Murata (1971) 理論のように拡散の方程式からはじめねばならないが、乾燥の場合はパラメータの諸因子による変動が複雑で、数学的な表現が困難である。ここでは、Eq. (25)、Eq. (27') からそれを導くことにする。その条件として、前述したように、次の状態量とその前の状態量だけで推定出来、それまでの時間の経過によらないことが望ましい。それには、その基礎方程式に時間 t の項を陽に含まないことが必要である。

まず、Eq. (25) からよく知られている式

$$\frac{dm}{d(Z)^2} = -\beta^2 m, \quad Z \geq Z_b \quad (39)$$

が得られる。この式には時間 t すなわち Z は陽に含まれていない。しかし Eq. (27') に関してはこれは不可能で

$$\frac{dm}{d(Z)^2} = \frac{\left(-\frac{1}{\sqrt{\pi}} + rZ\right)}{Z\left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} Zr + Z^2\right)} m, \quad Z < Z_b \quad (40)$$

となり、 Z が入ってくる。これは Spencer (1969) の用いた式である。これらの式に応じて Eq. (31) は

$$c_s \frac{\partial T_s}{\partial (Z)^2} + \sigma \frac{\partial m}{\partial (Z)^2} = \frac{(1-f)h}{D \rho_s a_v} (T_a - T_s) \quad (41)$$

となる。これらをこの研究での基礎方程式とする。

2. 乾燥方程式に関係する各種 パラメータの式表示

渡辺・清水 (1951) は、厚層の乾燥の解析で乾燥速度係数や平衡含水率を計算するのに、実験から得たグラフを用いた。しかし、電算機の利用を考える場合には、これを式表示しなければならない。この点に関して Henderson (1952) のすぐれた研究があり、また熱力学での諸結果が利用出来る。

2-1. 平衡含水率

吸湿物質中の水分が空气中へ移動する推進力は、吸湿物質中の水分の蒸気圧と空气中の水分蒸気圧の差である。この吸湿物質中の水分分子は吸湿物質分子によつて分子引力で吸引されているため、その蒸気圧は純水の蒸気圧より低い。この引力は物質分子に水分子が近づくほど大きくなるから、吸湿物質に含まれる水分の量が少なくなるほど大きくなり、したがつて、含水率が小さくなるほど含まれる水の蒸気圧は小さくなる。もしこの蒸気圧が空气中の水分の蒸気圧に等しければ、推進力は0となり、物質中の水分の出入が0の状態（平均して）すなわち平衡状態になる。もし一定の湿度の大気が与えられ、その水分の蒸気圧と物質中の水分の蒸気圧が等しくない場合には物質と大気の間水分の移動が行なわれ、物質中の含水率が変化して、最後にその含水率に対応する蒸気圧が大気中の蒸気圧に等しい状態となつて水分の移動が停止する。したがつて、大気中に吸湿物質を放置して平衡状態に達したときに得られる含水率、すなわち平衡含水率は大気の湿度の関数であり、前述したことから明らかなように、湿度が小さければ含水率も小さい。この関係は

$$1-rh = \exp(-k'M_e^n) \quad (42)$$

でよく近似される。ただし、この関係は温度によつても支配され、わずかではあるが、温度が上れば同じ湿度に対応する含水率は低下することが知られていた。Henderson (1952) はこれを表面吸着現象と考えて、Gibbs の吸着の式 (芝, 1950) を用いて Eq. (42) に温度の項を導入して

$$1-rh = \exp(-kT_g M_e^n) \quad (43)$$

を得ると共に、実測によつてこの関係が種々の農産物についてよく成立することを示した。なお、この平衡含水率の値には、一定大気中に長時間放置して得られる直接的な方法によるものと乾燥曲線の解析によつて得られる間接的な方法によるものとがあり、それらの相異なることが Henderson and Pabis (1961) によ

Table 1. Value of k and n for rough rice.

	Static			Dynamic
	W	M	D	W
n	2.155	2.258	2.103	2.443
$k' \times 10^5$	0.914	0.701	1.311	0.273

W: Dried from high moisture content
M: Dried from middle moisture content
D: Dried from low moisture content

つて指摘されている。前者を静的平衡含水率、後者を動的平衡含水率と言っている。

籾の静的平衡含水率については、渡辺ら (1953) が測定しており、著者が Eq. (43) に最小自乗法であてはめて得た値を Tab. 1 に示す。ただし、この値は M_e を%で表わした場合である。なお、前記渡辺・清水 (1951) が薄層の乾燥曲線から得た平衡含水率についても Eq. (43) をあてはめた。これは動的平衡含水率であるが、これも Tab. 1 に併記した。なお、山沢ら (1970) は静的平衡含水率についてこれらと独立に測定し、あてはめているが、 $n = 2.23$, $k = 1.05 \times 10^{-5}$ と、著者が渡辺らの静的平衡含水率にあてはめた結果とほぼ同様な値を得ている。実際の乾燥の解析には、動的平衡含水率を用いるのが適当であろう。この解析では、動的平衡含水率を用いる。しかし動的平衡含水率についての解析はなされておらず、それには温度と湿度以外の因子が作用しているように考えられる。それを反映して、静的平衡含水率に比し、その Eq. (43) からの分散は一桁程度大きい。しかし、その絶対値は含水率にして 0.25 % の標準偏差で表わされ、実用上差支えない程度のものである。なお、Eq. (43) の性質から、湿度 100 % に近づいた時には、平衡含水率は無限大となつてしまう。実際にはこのようなことはあり得ないので、この式には適用の限界があることがわかる。静的含水率では 10~90 % の範囲で測定されており、この範囲ではよくあてはまる。動的含水率では、測定の上限は 57 % である。ここでは Eq. (43) を M_e について解き小数で表現して

$$\begin{aligned} M_{ed} &= \exp(0.409 \ln\{-4.772 \ln(1-rh)/T_g\}) \\ 0 < rh < 0.9 \\ M_{ed} &= \exp(0.409 \ln(10.99/T_g)) \\ 0.9 < rh < 1.0 \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} M_{est} &= \exp(0.464 \ln\{-5.36 \ln(1-rh)/T_a\}) \\ 0 < rh < 0.9 \end{aligned} \quad (45)$$

を用いる。 $T = 293^\circ\text{K}$ で $rh = 0.9$ における値は 26.1

%である。Eq. (45) は静的平衡含水率の式である。

2-2. 乾燥速度係数

Eq. (25) を実時間 t の関数として表わせば、

$$m/m_0 = \frac{\alpha}{\beta^2} \exp \left\{ - \left(\frac{a_v \beta}{1-f} \right)^2 D t \right\} \quad (46)$$

となるから、乾燥曲線について、時間を普通軸に、自由含水率を対数軸にとり、その直線部の勾配と切片を見れば、Eq. (46) の指数関数の指数の係数

$$k_2 = \left(\frac{a_v \beta}{1-f} \right)^2 D \quad (47)$$

及び

$$k_3 = \alpha / \beta^2 \quad (48)$$

を簡単に測定することが出来る。

この k_2 を乾燥速度係数といい、Becker and Sallans (1955) は、これが温度の関数で化学反応における Arrhenius 型の方程式 (大竹, 1963) で表わされることを発見した。化学反応における一次反応速度は濃度に比例するもので、やはり Eq. (46) と同じ解をもち、アナロジー的にこの成立が考えられる。

Henderson (1961) はこの他、水分移動の原動力が蒸気圧であることから、相平衡に関する Clausius-Claeyron の式 (水谷・杉田, 1971) の成立を考え、また Barrer の拡張圧 (spreading pressure) に関する式、及び拡散係数に関する式を紹介している。これらは皆、絶対温度との関係で

$$k_2 = d \cdot \exp(-k_4/T) \quad (49)$$

で表わされるので、一般的に Eq. (49) の成立が考えられる。Henderson は 対数軸に k_2 、普通軸に T の逆数を取り、Eq. (49) が種々の穀物によくあてはまることを示すと同時に、その係数 d 及び f を決定している。特に粳に関しては、Allen (1960) のデータから、 k_2 が温度だけでなく大気湿度の関数であることを示している (Fig. 2)。しかしこの場合にも、湿度を一定にすれば Eq. (49) が成立することが示されている。Eq. (47) から明らかなように、 k_2 は粒子の形だけできまる因子と拡散係数の積で表わされる。これらはいずれも粒子の内部的因子であるから、 k_2 が外部的因子である湿度の影響を直接受けるはずはない。間接的な影響のメカニズムの一つとして、湿度の変化が粳の平衡含水率を変え、粒子の乾燥の範囲すなわち含水率の範囲を変えることが考えられる。拡散係数が拡散物質の濃度の関数であることはよく知られており、大谷 (1964) はこのことについて詳しく論じている。また、含水率によって粒子が縮み、これが Eq.

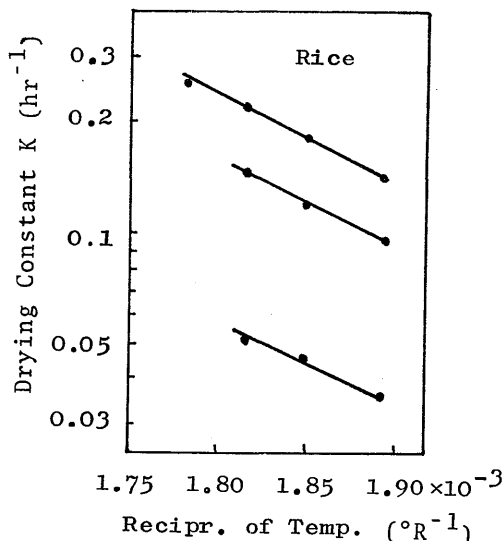


Fig. 2. Relationship between the drying constant and the reciprocal of temperature for rice (After Henderson *et al.*, 1961).

(46) の D の係数すなわち前節の λ^2 に影響することは、前節の固有値 λ の説明のところで詳しく述べた。この λ^2 は粒子の形によつてきまるが、一方、代表長さの二乗に反比例することを述べた。このような理由から、 k_2 が大気湿度の関数であることは理解できる。しかし、前述した渡辺・清水 (1951) の粳の乾燥曲線はすべて半対数グラフ上で直線となり、含水率依存性を打消す有力な証拠を与えている。この二つは矛盾するが、結局含水率の範囲の問題と考えられる。大気湿度は、粒子の減率乾燥の含水率の範囲を大きく変動させるものと見ればよいであろう。これは、初期含水率を一定とした場合に、平均含水率は最終的な含水率すなわち平衡含水率によつてきまること、そうして初期含水率が低ければ乾燥中の含水率自体の変動は少なく、その平均含水率が平衡含水率によつて大きく変動することを考えれば説明がつく。

Henderson and Pabis (1961) が引用した Allen (1960) の論文には、rice に関するデータが直接ないために、引用した Henderson のデータ (Fig. 2 参照) を使って rh に関する項を導入し、この研究では粳の乾燥速度係数として次式を用いる。

$$k_2 = d \exp \left(- \frac{k_4}{T} \right) \quad (49)$$

$$d = (0.93413 - 1.03792 rh) \times 10^5, \quad (50)$$

$$= 0, \quad \begin{matrix} rh < 0.90 \\ rh > 0.90 \end{matrix}$$

$$k_4 = 3.7277 \times 10^3, \quad rh < 0.665 \quad (51)$$

$$= (0.1037037rh - 0.135919) \times 0.55555 \times 10^5,$$

$$0.655 < rh < 1.0$$

なお, Smith *et al.* (1967) の Geometry Index によつて

$$k_2 = GI \frac{D\pi^2}{l^2} \quad (52)$$

であるから, これと粉に関する第2節第5項のデータより

$$D = \frac{l^2}{GI \cdot \pi^2} k_2 = 0.2815 \times 10^{-6} k_2 \quad (53)$$

が得られる. この Eq. (53) の k_2 の係数は, Eq. (47) の D の係数が粒子の形と大きさの関数であることから明らかのように, やはり形と大きさの関数であつて, 含水率の減少によつて縮めば変化する値である. しかし, この拡散係数 D の必要なのは乾燥初期の極く短時間であり, 定数とみて差支えない.

2-3. $B_1 = k_3 = \alpha/\beta^2$

この B_1 の値は減率第一段にあつては1であり, 減率第二段にあつては, 第1節で説明したように, 拡散方程式のフーリエ級数解の初節の係数が対応し, 粒子の形だけの関数で大きさには関係ない定数である. これは時間を普通軸に, 自由含水率を対数軸上にとつた乾燥特性曲線において, 直線部を延長した対数軸上の切片の値の初期自由含水率に対する比として実験的に極めて簡単に求めることが出来る. この粉に対する値として, 前記渡辺・清水のデータのうちから初期含水率を記録しているもの7個を選んで計算し, その平均値として

$$k_3 = \alpha/\beta^2 = 0.8861 \quad (54)$$

を求めた. なお, これより Eq. (29) によつて

$$Z_b = 0.2022, \quad r = 2.381$$

が求まる. β^2 は Eq. (47), Eq. (53) より

$$\left(\frac{a_v \beta}{1-f} \right)^2 = \frac{1}{0.2815 \times 10^{-6}} = 0.35527 \times 10^7$$

として

$$\beta^2 = \left[\frac{1-f}{a_v} \right]^2 \times 0.35527 \times 10^7$$

が得られる.

2-4. 熱伝達率

村田 (1973a) が求めた推定式

$$j = \frac{h}{c_g G} P_r^{2/3} = 0.1 / (Re^{0.41} - 1.5) \quad (55)$$

$$13 < Re < 2136$$

を用いる.

堆積穀類の熱伝達率について測定した例は少ないが, Boyce (1965) が大麦について

$$h' = a_v h = 144.6 G^{0.6} \quad (56)$$

を求め, また Spencer (1969) はこれを

$$h' = a_v h = 5.136 [GT_g]^{0.6011} \quad (57)$$

の形に拡張し, 小麦堆積層の乾燥計算に利用した.

Boyce の測定法は薄層の非定常温度変化を利用したもので, 計算法は村田 (1973a) が粉の単粒の熱伝達率を測定したものと全く同じである. ただし, a_v を分離していない. これは実際利用に当つて, 同じ穀粒を用いる場合には支障のないものである. しかし, 穀物の種類が異なる場合には, 表面積と形状が変わるので, そのまま利用するのは危険である.

風温 60°C で風速 0.1 m/sec について計算した結果では,

$$W = 0.1 \text{ m/sec.} = 360 \text{ m/hr.}$$

$$\nu = 0.196 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec.}$$

$$\rho_g = 1.026 \text{ kg/m}^3$$

$$G = 1.026 \times 360 = 369.36 \text{ kg/hr} \cdot \text{m}^2$$

$$2a_e = 0.333 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$P_r = 0.241 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$T_g = 273 + 60 = 333^\circ\text{K}$$

$$a_v = 1089 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$Re = 17.0$$

として, Eq. (55) では

$$h' = a_v h = 1089 \times 6.6 = 7306 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$$

Eq. (57) では

$$h' = 5891 \text{ kcal/m}^3 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$$

であり, Boyce の式で計算した結果は村田 (1973a) が導いた式と大体同じ値を示す. いずれにしても, 村田 (1973a) が検討した DeAcetis and Thodos (1960) の原式に比べれば 1/10 弱であつて, 無機工業製品で得られている一般の熱伝達率に比べ, 穀物の熱伝達率が極めて小さいものであることに疑いはなさそうである.

2-5. 粉のその他の物理性

村田 (1973a) が求めた結果と空気ピクノメータによる測定から,

$$a_v = 1107 \text{ m}^2/\text{m}^3 \quad (M=11\%)$$

$$S/V = a_v / (1-f) = 2670 \text{ m}^2/\text{m}^3 \quad (M=11\%)$$

$$S = 48.64 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{a grain} \quad (M=11\%)$$

$$V = 17.71 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \quad (M=11\%)$$

$$\begin{aligned}
 f &= 59.7\% & (M=11\%) \\
 &= 61.7\% & (M=0) \\
 2a &= 0.761 \times 10^{-2} \text{m} & (M=11\%) \\
 2b &= 0.357 \times 10^{-2} \text{m} & (M=11\%) \\
 2l &= 0.215 \times 10^{-2} \text{m} & (M=11\%) \\
 2a_g &= 0.333 \times 10^{-2} \text{m} & (M=11\%) \\
 \rho_s(1-f) &= 578 \text{ kg/m}^3 & (M=11\%) \\
 \rho_s &= 1434 \text{ kg/m}^3 & (M=11\%) \\
 \rho_s &= 1360 \text{ kg/m}^3 & (M=0) \\
 \text{千粒重} &= 22.90 \text{ gr} & (M=0) \\
 &= 25.40 \text{ gr} & (M=14\%) \\
 c_s &= 0.265 + 1.07 M / (M+1) & (58)
 \end{aligned}$$

を用いる。

2-8. 大気の物理性

空気及びそれに含まれる水蒸気の性質はよく知られており、次の値及び式を用いる。

$$\rho_g = 3.412 - 1.25 \times 10^{-5} (906.32 - T_g) T_g \text{ kg/m}^3 \quad (59)$$

$$\begin{aligned}
 c_g &= 0.241 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C} \\
 TK_g &= 0.002945 + 0.65 \times 10^{-4} T_g \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C} & (60)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \nu &= [-0.006867 + 0.1249 \times 10^{-5} T_g (T_g + 154.38)] \\
 &\quad \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec} & (61) \\
 P_r &= 0.71
 \end{aligned}$$

(以上、横堀・久我 (1960) による³⁾)

$$\sigma = 597.3 - 0.559 (T_g - 273.19) \quad (\text{内田, 1965}) \quad (62)$$

$$p_w = \frac{1.033H}{H + 0.622} \text{ kg/cm}^2 \quad (63)$$

$$\begin{aligned}
 \ln p_s^{4)} &= -18.1973 (T_0/T_g - 1) + 5.02808 \ln \\
 &\quad (T_0/T_g) - 3.1813 \times 10^{-7} [\exp\{26.121 \\
 &\quad (1 - T_0/T_g)\} - 1] + 18.7265 \times 10^{-13} \\
 &\quad [\exp\{-8.039 (T_0/T_g - 1)\} - 1] \\
 &\quad + 0.03247 \quad (\text{守安, 1964}) & (64)
 \end{aligned}$$

ただし $T_0 = 373.16^\circ\text{K}$

$$rh = p_w/p_s \quad (\text{水谷・杉田, 1971}) \quad (65)$$

$$i = 0.241 T_g + H(597.3 + 0.441 T_g) \quad (\text{内田, 1965}) \text{ kcal/kg}^{5)} \quad (66)$$

3. 混 合 乾 燥

前述の渡辺・清水 (1951), Boyce (1965), Hen-

derson (1968) 及び Spencer (1969) の乾燥計算法はいずれも、堆積層の乾燥 (Deep-bed drying) すなわち非混合型の乾燥に関するものである。この乾燥法は、乾燥空気が穀粒を乾燥し水分を吸収しながら穀粒層を通過するので、湿度が大きくなり、層の乾燥速度は低下し、必然的に乾燥むらを生ずる。この乾燥むらは、それが大きい場合には、粉の品質や貯蔵にとって致命的なものになる。従来の農家単位の静置式乾燥機では、乾燥終了後全体を混合し放置することによって、この乾燥むらを是正する方法がとられてきた。この効果は、山下・笈田 (1966) によつてはじめて研究された。それによると、乾燥むらの生じた粉を混合した場合には、相互間の水分移行が行なわれ平均化していくことが立証されている。しかし一方、それには限度があること、また低温になるとその効果が減少することが述べられている。例えば常温では、5%の乾燥むらが3%差に平均化されるのが限界のようである。

これらのことと、胴割れやその他の過乾燥による乾燥しすぎた粉の品質劣化が、再吸湿によつて回復するとは考えられないことから、実際上の効果はあまり期待出来ないと思われる。

さて、この乾燥むらを少なくする方法として、層を薄くすること、風速を大きくすることがある。いずれも、流入乾燥空気と流出乾燥空気の湿度及び温度の差を小さくさせることを目的としている。また、目的とする粉の含水率に近い水蒸気圧をもつ大気 (秋期乾燥時の常温空気) によつて、長期間乾燥することも考えられる。しかし、これらはコンバイン収穫が必要とする高能率且つ経済的な乾燥法と矛盾するものである。

混合層乾燥は、堆積層においては固定されていた (平均の風速方向に) 粒子の位置を乾燥中混合によつて移動させ、理想的には、すべての粒子が同じ位置を占めるようにしたものである。こうすることによつて、すべての粒子は同じ乾燥条件におかれるから、いかに乾燥空気の状態の位置的变化が大きくとも粒子の乾燥状態は同一に保たれ、乾燥むらを生じない。実際には理想的な状態を得ることは困難と考えられるが、原理的には乾燥むらをなくすることが出来る。堆積乾燥が原理的に乾燥むらが不可避だったのに比し、この点大きな意義をもつものと考えられる。ここでは理想的な状態を考え、次のモデルに沿つて解析する。

3-1. 混合乾燥のモデル (Fig. 3)

3) 表を著者が式にあてはめた。

4) 単位は kg/cm^2

5) 計算の便宜上、エンタルピの原点を 0°C でなく、 0°K においた。

1) 乾燥空気は入口から出口に達するまで穀物の水分を吸収し、湿度が増し温度が減少する。すなわち空気は位置的にも時間的にも変動する。この点、堆積層の場合と同じである。

2) 穀粒は常に混合しているの、その状態は乾燥器内部の位置に関係しない。しかし、時間の経過とともに含水率は減少する。すなわち穀粒の状態は時間の関数であるが、位置の関数ではない。

3) 粒子の乾燥速度は乾燥機内の各位置によつて異なるが、粒子が混合するために実際の乾燥速度はその平均となり、位置に関係しない。

4) 粒子の温度上昇速度は乾燥機内の各位置によつて異なるが、粒子が混合するために実際の乾燥速度はその平均となり、位置に関係しない。

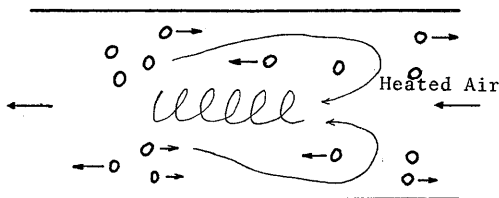
この (3) と (4) を数式で表わすと

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\frac{1}{V} \int_0^{l'} R dx \quad (67)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{V} \int_0^{l'} R' dx \quad (68)$$

である この R と R' は乾燥速度と温度上昇速度で、その位置における粒子の状態 (含水率・温度) と乾燥空気の状態 (湿度・温度) の関数である。粒子の状態は位置の関数ではないが、空気の状態は位置の関数なので、結局 R と R' は位置の関数となる。

なお、ここで t の無次元化された変数 Z を用いな



1. Heated air absorbs moisture from grains, and its humidity increases.

2. Grains are stirred always, and their temperature and moisture content are independent of their position.

Fig. 3. Model of drying procedure of rough rice in mixing dryer.

かつたのは、Eq. (24) から明らかなように、 Z が状態で変化する量 D を含み、この場合適当でないからである。

3-2. 混合乾燥の基礎方程式

第1節第4項で示した方程式 Eq. (39) 及び Eq. (40) の右辺は乾燥空気の状態の関数であつて、それはこの場合前節に示したように位置 x の関数である。一方これらの式の左辺は含水率 M の時間に関する微分であり、前節に示したように、 M は全層を通じて均一で位置に関係しない。従つて、これらの等式がそのままの記号を用いて成立しないことは明らかである。これらの式の右辺はこの場合前節で述べた局部乾燥速度 R を意味するのであつて、混合層では次のように書き改められる。

$$R = k_2(M - M_e) \quad (69)$$

$$Z \geq Z_b$$

$$R = \frac{-Z \left(-\frac{1}{\sqrt{\pi}} + rZ \right)}{t \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} Z + rzZ \right)} (M - M_e) \quad (70)$$

$$Z < Z_b$$

ただし

$$Z = \frac{S}{V} \sqrt{Dt} \quad (24)$$

また、粒子の乾燥分だけ空気の絶対湿度は増すから、

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\rho_s(1-f)}{G} R \quad (71)$$

が得られる。また、これによつて Eq. (67) は

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} &= -\frac{G}{V\rho_s(1-f)} \{H(l') - H(0)\} \\ &= -Gu\{H(l') - H(0)\} \end{aligned} \quad (72)$$

となる。

次に、Eq. (31) から

$$c_s\rho_s(1-f)R' + \sigma\rho_s(1-f)R = h'(T_g - T_s) \quad (73)$$

が得られる。これは Eq. (68) の R' を決定するものである。

また、乾燥空気のエンタルピは穀温を上昇させる分だけ減少するとして、

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -\frac{c_s\rho_s(1-f)}{G} R' \quad (74)$$

を得る。また、これによつて Eq. (68) は

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{G}{c_s\rho_s(1-f)} \{i(0) - i(l')\} \quad (75)$$

となる。

さて, Eq. (71) と Eq. (74)は,

$$y = x/l' \quad (76)$$

として,

$$\frac{\partial H}{\partial y} = \left\{ \frac{l' \rho_s (1-f)}{G} \right\} R = R/Gu \quad (71')$$

$$\frac{\partial i}{\partial y} = -c_s \left\{ \frac{l' \rho_s (1-f)}{G} \right\} R' = -\frac{c_s}{Gu} R' \quad (74')$$

また,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = - \int_0^1 R dy \quad (67')$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \int_0^1 R' dy \quad (68')$$

が得られる。これ以外の方程式に x は陽に入っていないから, Eq. (72) による変数変換は何らの影響も受けない。また, x の範囲 l' の影響は, この変換によつてすべての方程式を通じて粒子群単位質量当り質量風量となつて消える。また, y の範囲は 0 から 1 であつて l' の影響が消える。また質量風速 G も, 単位質量当りの風量となつて消える。したがつて混合乾燥においては, 乾燥空気の通過層すなわち混合層の厚さは無関係で, 乾燥速度は風速でなく穀粒単位体積当りの風量が関与する。ただし, 熱伝達率は風速の関数だから, その計算には風速が必要であり, この意味では風速が関係する。

すなわち, 基礎方程式は風速に関係しないが, その計算に入れるデータが風速に関係する。しかし混合層, たとえば Fig. 3 に示す L. S. U. 型混合乾燥機では, この風速の推定は極めて困難である。

3—3. 基礎方程式の数値解法

前項で並べた基礎方程式部は, 一階の偏微分方程式であつて, これを差分化することによつて解くことが出来る。そうして, その精度は Δt 及び Δy を小さくすることによつて高めることが出来る。しかし, この分割数は極めて大きく, 計算使用時間及び費用は大型コンピュータによつても極めて大きくなり, この計算法の価値を半減してしまふ。

さて, この研究の最初に述べたように, このような計算の最初は渡辺・清水によつて行なわれ, その場合の分割数は $\Delta t = 0.33 \text{ hr} (20 \text{ min})$ という極めて粗いものであつたにもかかわらず, 納得出来る値が得られている。したがつて, 諸種のパラメータが如何に精密化されても, これより一桁程度分割数を大きくすることで充分高い精度が得られると考えられる。このこと

は, 乾燥速度の時間的变化が小さいことに起因しているのである。しかし, この研究の場合には, 熱伝達の要素が加わりそれによる昇温速度は早く, またその時間的变化は極めて大きい。差分法は, その分割時間内で諸量を一定とする。これは逆に, 一定とみなせるように分割幅を小さくしなければならないことを意味する。したがつて, その分割幅は, 諸量の変化速度が大きいほど小さくしなければならない。そうしないと, 計算結果が不正確になるだけでなく, 矛盾を生ずる。この場合であれば, 昇温速度は 0 に収れんしていつているのに, それを一定とする時間分割幅が大きいと, 穀温は風温より上昇し, また穀層を通過した空気は絶対温度よりも低下することがある。これは著者の計算で経験したことである。このような結果を防止し, 計算能率をよくするために, ここでは前項の基礎方程式をそのまま差分化せず, 解析的方法を併用する。

まず Eq. (70) を, それに関与するパラメータの変化が小さいので一定と考え

$$R = \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial N}{\partial Z} \cdot \frac{\partial Z}{\partial t}, \quad M = N \quad (77)$$

として解き, $t + \Delta t$ に対する $N + \Delta N$ を求めて ΔN を計算し, $R = -\Delta N / \Delta t$ として

$$R = - \left\{ \frac{1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} Z_A + r Z_A^2}{1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} Z + r Z^2} - 1 \right\} (M - M_e) / \Delta t \quad (78)$$

$$Z = \frac{S}{V} \sqrt{Dt} \quad (24)$$

$$Z_A = \frac{S}{V} \sqrt{D(t + \Delta t)} \quad (79)$$

$$Z < Z_b$$

を導く。この式は, Eq. (70) の右边を Δt 区間ですべて一定とする場合に比し, 精度が高い。これは, R を Δt 区間の最初の値でなく平均値に近い値で計算するからである。

同様に, Eq. (69) から,

$$R = (M - M_e)(1 - \exp(-k_2 \Delta t)) / \Delta t, \quad Z \geq Z_b \quad (80)$$

が得られる。また, Eq. (78) に対応して

$$R' = \left[T_g - T_s + L_1 \left\{ r \left(\frac{S}{V} \sqrt{D} \right)^2 - \frac{S}{V} \sqrt{\frac{2DL_2}{\pi}} I(r) \right\} (M - M_e) \right]$$

$$\begin{aligned} & \times (1 - \exp(-L_2 dt)) / dt \\ & - L_1 \frac{S}{V} \sqrt{\frac{2DL_2}{\pi}} (M - M_e) \{I(t + dt) \\ & - I(t)\} / dt, \\ & Z < Z_b \end{aligned} \quad (81)$$

も同様に導かれる。

ここに

$$L_1 = \frac{\sigma \rho_s (1-f)}{h' \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} Z + r Z^2\right)} \quad (82)$$

$$L_2 = \frac{h'}{c_s \rho_s (1-f)} \quad (83)$$

$$I(t) = \sqrt{L_3} \left[1 - \frac{L_3}{1.3} + \frac{L_3^2}{1.3 \cdot 5} - \dots \right] \quad (84)$$

$$L_3 = 2L_2 t \quad (85)$$

である。

同様に, Eq. (80) に対応して

$$\begin{aligned} R' &= \left[T_g - T_s - \frac{\sigma k_2}{C_s (L_2 - k_2)} (M - M_e) \right] \\ & \times (1 - \exp(-L_2 dt)) + \frac{\sigma k_2}{C_s (L_2 - k_2)} \\ & (M - M_e) (1 - \exp(-k_2 t)) / dt, \\ & Z < Z_b \end{aligned} \quad (86)$$

が得られる。また Eq. (71') 及び Eq. (74') より

$$\Delta H = \frac{R}{Gu} dy \quad (87)$$

$$di = - \frac{C_s}{Gu} R' dy \quad (88)$$

また, Eq. (66) より

$$\begin{aligned} \Delta T_g &= \frac{(i + di) - 597.3(H + \Delta H)}{0.441(H + \Delta H) + 0.241} \\ & - \frac{i - 597.3H}{0.441H + 0.241} \end{aligned} \quad (89)$$

が得られる。

また, Eq. (67'), Eq. (68') から

$$\Delta M = - \sum (R dt) dy \quad (90)$$

$$\Delta T_s = \sum (R' dt) dy \quad (91)$$

が得られる。

4. 応用計算例 (実例と計算値の比較)

Fig. 4 に八郎瀉訓練所用 カントリエレベータに用いられている ルイジアナ 大学型乾燥機を示す (森野ら, 1969)。これはこの原理図からも明らかなように, 連続式混合型乾燥機で, 粗は上部から入れられ, 流下混合しながら乾燥され, 最下部の粗排出口に達する。途中の乾燥部は 4 セクションに分かれ, 各々異なる風量, 風温, 風湿を与えることが出来る。したがって, ある一定の粗群に固定して乾燥を考えれば, その粗群は一定時間毎, すなわち, 他セクションに到着する毎に, 流入空気の状態, すなわち境界条件が変化する。したがって, このような場合乾燥計算に際して一定時間毎に境界条件を変更しなければならない。Fig. 5 及び 6 の実線は, Table 2 のような流入空気の状態変化に基き, 前記八郎瀉訓練所用カントリエレベ

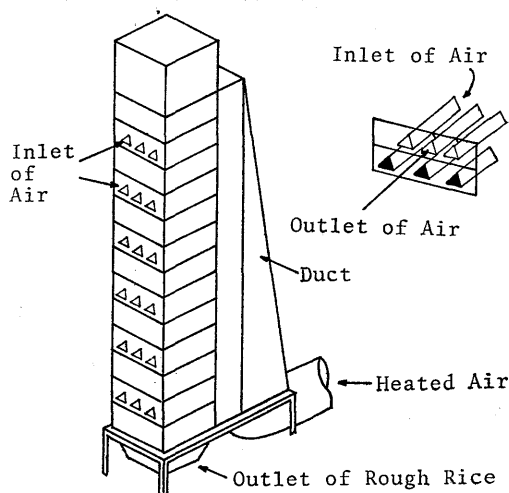


Fig. 4. L. S. U. type dryer (After Morino, 1969).

Table 2. Drying condition.

Section	Unit	Symbol	1	2	3	4
Atm. Temp.	°C	—	21.2	21.2	21.2	21.2
Air Temp.	°C	$T_{g,in}$	60.0	60.0	54.0	54.5
Air Hum.	kg/kg'	H_{in}	0.0154	0.0155	0.0154	0.0154
Exh. Temp.	°C	$T_{g,out}$	29.3	34.0	33.0	32.7
Exh. Hum.	%	H_{out}	89.5	71.7	72.5	67.0
Air Flow Rate	kg/kg·hr	Gu	2.798	3.290	2.670	3.970
Time	min	t	40.0	80.0	120.0	160.0

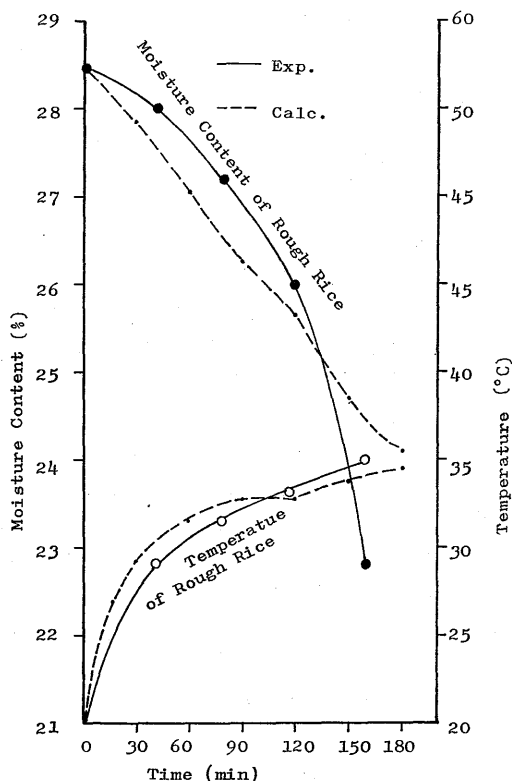


Fig. 5. Comparison of observed characteristics of L. S. U. type dryer with calculated results by this theory (grain).

タ乾燥機について農産施設小委員会 (1968) が実測したデータである。図中の破線は、今まで述べてきた理論と諸パラメータを用いて計算した結果である。この場合風速 v は与えられていないので、熱伝達率の計算に用いる値として 0.1 m/sec を仮定した。また籾単位質量当りの風量は籾のみかけ密度を $1 \text{ 石当り } 100 \text{ kg}$ として概算した委員会のデータを、湿量基準から乾量基準に換算して 2 割増としたものを用いた。

これは計算の段階で効率 ($EFF=1.2$) として入れた。また、熱伝達率から熱伝達速度 (heat transfer rate, Spencer, 1969) への計算の際に用いる籾の表面積は単粒の実測値 $1/5$ とした。これは混合層の状態では籾の表面がお互いに多く接触し、実際に空気と熱の交換が行なわれている面積は極めて小さいと推定されるからである。

含水率の低下傾向が逆である点を除いて、大体においてよく一致していると言える。Fig. 6 は排気温度と排気湿度であるが、排気温度が $30 \sim 40$ 分において計算値が極めて低下しているのを除いて、絶対値も傾向

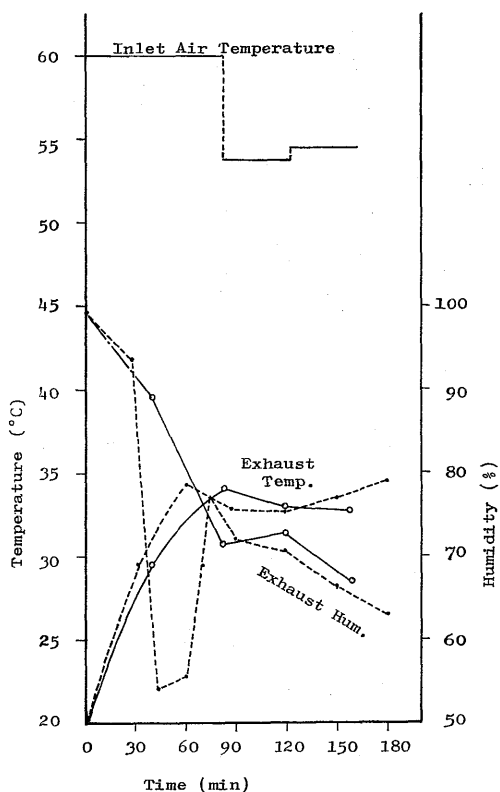


Fig. 6. Comparison of observed characteristics of L. S. U. type dryer with calculated results by this theory (air).

も極めてよく一致している。この排気温の途中での相異は実測値が 1 点しか存在せず、その原因ははつきりしない。いずれにしても、この理論の正確な裏付けと補正のためには、このような実際規模のものでなく、すべてにおいてよく制御された模型実験を必要とする。しかしこの実測データとの比較は、この理論が充分に役に立つものであることを示している。

要 約

現在我が国の大規模乾燥施設に採用されている籾の混合乾燥について、数学的モデルを与えて理論と計算法を導いた。その具体的計算の基礎は最近大きな発展が見られる薄展理論で、これに多くの考察を加え、それを基に種々のデータを計算機の利用に都合のよいように式の形を整理した。これらの成果を利用し、混合乾燥機の調査データを解析した結果、大体の一致を見ることができた。

付録 I. Eq. (78) の導入

Eq. (68) より

$$\frac{dN}{dt} = \frac{Z\left(-\frac{1}{\sqrt{\pi}} + rZ\right)}{t\left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}Z + rZ^2\right)}(N - N_e) \quad (\text{A-1})$$

N_e は t の関数であるが, $(t, t+dt)$ で定数とし,

$$\ln(N - N_e) = \ln\left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}Z + rZ^2\right) + C \quad (\text{A-2})$$

ゆえに

$$\ln(N_d - N_e) = \ln\left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}Z_d + rZ_d^2\right) + C \quad (\text{A-3})$$

Eq. (A-3)-Eq. (A-2) より

$$F = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}Z + rZ^2 \quad (\text{A-4})$$

として

$$\frac{N_d - N_e}{N - N_e} = \frac{F_d}{F} \quad (\text{A-5})$$

$$\therefore N_d - N = \frac{F_d}{F}(N - N_e) \quad (\text{A-6})$$

$$\therefore N_d - N = \left(\frac{F_d}{F} - 1\right)(N - N_e) \quad (\text{A-7})$$

$$\therefore R = -\left(\frac{N_d - N}{dt}\right) = -\left(\frac{F_d}{F} - 1\right)(N - N_e)/dt \quad (\text{A-8})$$

これより

$$N \rightarrow M, N_e \rightarrow M_e$$

として, Eq. (78) が得られる.

付録 II. Eq. (81) の導入

Eq. (73) より

$$c_s \rho_s (1-f) R' + \sigma \rho_s (1-f) R = h'(T_g - N_s) \quad (\text{A-9})$$

$$\frac{dN}{dt} = -R, \quad \frac{dN_s}{dt} = R' \quad (\text{A-10})$$

$$\frac{dN_s}{dt} + L_2 N_s = \frac{\sigma}{c_s} \frac{dN}{dt} + L_2 T_g \quad (\text{A-11})$$

Eq. (A-2) より

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= c' \frac{Z}{t} \left(-\frac{1}{\sqrt{\pi}} + rZ\right) \\ &= c' \left(-\sqrt{\frac{D}{\pi}} \cdot \frac{S}{V} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} + \frac{rS^2}{V^2} D\right) \end{aligned} \quad (\text{A-12})$$

これを Eq. (A-11) に代入して解くと,

$$N_s = T_g + A \exp(-L_2 t) + c' \frac{\sigma}{c_s} e^{-L_2 t} \int e^{L_2 t}$$

$$\begin{aligned} &\times \left(-\sqrt{\frac{D}{\pi}} \cdot \frac{S}{V} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} + \frac{rS^2}{V^2} D\right) dt \\ &= T_g + A \exp(-L_2 t) + \frac{\sigma}{c_s} \cdot \frac{(N - N_e)}{F} \\ &\times \left(-\sqrt{\frac{2D}{L_2 \pi}} \cdot \frac{S}{V} I(t) + \frac{\sigma^2 S^2}{L_2 V^2} D\right) \end{aligned} \quad (\text{A-13})$$

ゆえに,

$$\begin{aligned} N_{s,d} &= T_g + A \exp(-L_2(t+dt)) + \frac{\sigma}{c_s} \cdot \frac{(N - N_e)}{F} \\ &\times \left(-\sqrt{\frac{2D}{L_2 \pi}} \cdot \frac{S}{V} I(t+dt) + \frac{\sigma^2 S^2}{L_2 V^2} D\right) \end{aligned} \quad (\text{A-14})$$

$$\therefore N_{s,d} - N_s = -A \exp(-L_2 t) \cdot (1 - \exp(-L_2 dt))$$

$$\begin{aligned} &-\frac{\sigma}{c_s} \cdot \frac{(N - N_e)}{F} \sqrt{\frac{2D}{L_2 \pi}} \cdot \frac{S}{V} \\ &\times \{I(t+dt) - I(t)\} \end{aligned}$$

Eq. (A-13) を A について解き, これに代入し,

$$\begin{aligned} &= \left[T_g - N_s + \frac{\sigma}{c_s} \cdot \frac{(N - N_e)}{F} \left\{ -\sqrt{\frac{2D}{L_2 \pi}} \cdot \frac{S}{V} I(t) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{r^2 S^2}{L_2 V^2} D \right\} \right] (1 - \exp(-L_2 t)) \\ &\quad - \frac{\sigma}{c_s} \cdot \frac{(N - N_e)}{F} \sqrt{\frac{2D}{L_2 \pi}} \cdot \frac{S}{V} \{I(t+dt) - I(t)\} \\ &= \left[T_g - N_s + L_1 (N - N_e) \left\{ \sqrt{\frac{2DL_2}{\pi}} \cdot \frac{S}{V} I(t) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{r^2 S^2}{V^2} D \right\} \right] (1 - \exp(-L_2 dt)) \\ &\quad - L_1 \sqrt{\frac{2DL_2}{\pi}} \cdot \frac{S}{V} \{I(t+dt) - I(t)\} (N - N_e) \end{aligned} \quad (\text{A-16})$$

が得られる. これより

$$N \rightarrow M, N_e \rightarrow M_e$$

として, Eq. (81) が得られる.

付録 III. Eq. (86) の導入

$$\frac{dN_s}{dt} + L_2 N_s = \frac{\sigma}{c_s} \cdot \frac{dN}{dt} + L_2 T_g \quad (\text{A-11})$$

を用いる. まず, Eq. (69) より

$$\frac{dN}{dt} = -k_2 (N - N_e) \quad (\text{A-17})$$

$$N - N_e = c' \exp(-k_2 t) \quad (\text{A-18})$$

$$\frac{dN}{dt} = -c' k_2 \exp(-k_2 t) \quad (\text{A-19})$$

だから Eq. (A-19) を Eq. (A-11) に代入して

$$\frac{dN_s}{dt} + L_2 N_s = -\frac{c' \sigma k_2}{c_s} \exp(-k_2 t) + L_2 T_g \quad (\text{A-20})$$

$$\therefore N_s = A \exp(-L_2 t) + \frac{c' \sigma k_2}{c_s(k_2 - L_2)} \exp(-k_2 t) + T_g \quad (\text{A-21})$$

$$\therefore N_{s,d} = A \exp(-L_2(t + \Delta t)) + \frac{c' \sigma k_2}{c_s(k_2 - L_2)} \exp(-k_2(t + \Delta t)) + T_g \quad (\text{A-22})$$

$$\therefore N_{s,d} - N_s = -A \exp(-L_2 t) \cdot (1 - \exp(-L_2 \Delta t)) + \frac{c' \sigma k_2}{c_s(L_2 - k_2)} \exp(-k_2 t) \times (1 - \exp(-k_2 \Delta t)) \quad (\text{A-23})$$

Eq. (A-21) を A について解き

$$\begin{aligned} -A &= \left(T_g - \frac{c' \sigma k_2}{c_s(L_2 - k_2)} \exp(-k_2 t) - N_s \right) \exp(L_2 t) \\ &= \left\{ T_g - N_s - \frac{\sigma k_2}{c_s(L_2 - k_2)} (N - N_e) \right\} \exp(L_2 t) \end{aligned} \quad (\text{A-24})$$

が得られ、これを Eq. (A-23) に代入して

$$\begin{aligned} N_{s,d} - N_s &= \left\{ T_g - N_s - \frac{\sigma k_2}{c_s(L_2 - k_2)} (N - N_e) \right\} \\ &\quad \times (1 - \exp(-L_2 \Delta t)) + \frac{\sigma k_2}{c_s(L_2 - k_2)} \\ &\quad \times (N - N_e) (1 - \exp(-k_2 \Delta t)) \end{aligned} \quad (\text{A-25})$$

が得られる。これを Δt で除して、

$$N \rightarrow M, N_e \rightarrow M_e$$

として Eq. (86) が得られる。

付録 IV. 混合乾燥計算プログラム (Fig. 7 参照)

IV-1. 言語: FACOM 230-60 ALGOL

Hタイプ(026)カード

IV-2. 計算機: 九州大学大型計算機

FACOM 230-60

IV-3. 記号(大域的)の説明

H : 絶対温度

HK : Eq. (40)における Colburn J. factor をきめる実験式における係数。よれば Eq. (40)では 0.1 となっている。

PSS : 飽和蒸気圧

PW : 蒸気圧

RH : 相対湿度

I : エンタルピ (絶対 0° が基準)

TG : 空気温度

CS : 穀粒の比熱

PG : 空気の密度

CG : 空気の比熱

KG : 空気の熱伝導率

NIU : 空気の動粘性係数

PR : 空気のプラントル数

SIG : 蒸発の潜熱

PS : 粉の密度 (真)

F : 空隙率

AV : 単位体積当りに含まれる粒の表面積

A2 : 粉の相当直径

RE : レイノルズ数

H1 : 熱伝達率

V : 空塔速度

V1 : 最初の風量に対応する基準風速

ME : 平衡含水率

K2 : (47)式の k_2

D : 拡散係数

GAMA : Eq. (27') の r

Z : Eq. (24) の Z

R : 局所乾燥速度

R1 : 局所穀粒温度上昇速度

TAU : 時間

T1ME : 計算する時間の最後

DY : 混合層の分割幅

M0 : 初期含水率

TS0 : 初期穀粒温度

TS : 穀粒温度

GU : Eq. (69) に出てくる穀粒単位質量当りの質量風量

N : 混合層の計算上の分割数

ZB : Eq. (25)~Eq. (29) に出てくる Z_b

AL : Eq. (54) から求まる α の値

BE : Eq. (47) 及び Eq. (53) から求まる β の値

RR : 平均乾燥速度

RR' : 平均穀温上昇速度

NN : 分割層の番号

EFF : 乾量基準に対する風量の換算比

J, JJ, II, IN : 計算の進行状態をきめる計算上の整数

JIKAN : この時間がくると乾燥条件が変わる

TG0 : 流入空気の温度 (一定時間がくると変更されるので, JIKAN に対応した配列で与えられる)

H0 : 流入空気の湿度(同上)

GU0 : 穀粒単位体積当りの風量(同上)

IV-4. プログラムの説明

1~7: 大域の変数の宣言

8~14: 流入空気の状態が一定時間毎に変わるのでそれを指定する手続きである。Iを入れることによってI番目の空気の状態、すなわち温度、絶対湿度、穀物単位質量当りの質量風量、風速等が与えられる。

13 : V1 は GU0 (1) に対応する風速で、他の風速は風量に比例するとする。

15~27: Eq. (81) 及び Eq.(82) で定義される関数 $I(t)$ の計算手続き。この場合の X は Eq. (81) の L_3 に当る。

28~33: 空気温度 TG を与えて、それに対応する飽和蒸気圧 PSS (kg/cm^2) を与えるプログラム。計算式は Eq. (64) による。

39~70: 諸物理定数の計算

40 : TG から PSS を計算

41 : Eq. (63) によって蒸気圧の計算

42 : Eq. (65) によって相対湿度の計算

43 : Eq. (66) によってエンタルピの計算

44 : Eq. (58) によって穀粒比熱の計算

45 : Eq. (59) によって空気密度の計算

46 : 空気比熱

47 : Eq. (60) により空気熱伝導率の計算

48~49: Eq. (61) により 空気熱動粘性係数の計算

50 : 空気のプロントル数

51 : Eq. (62) による蒸発の潜熱の計算

52 : 粉の飽和密度

53 : 粉の相当直径

54 : 乾燥風のレイノルズ数

55~58: Eq. (55) による熱伝達率の計算

59~61: Eq. (44) による粉の平衡含水率の計算

62~68: Eq. (49), Eq. (50), Eq. (51) による乾燥速度係数 k_2 の計算

69 : Eq. (53) による拡散係数 D の計算

70~110: 混合乾燥に関する基礎微分方程式の解法

73 : Eq. (83) の計算

74 : Eq. (24) による無次元化された時間 Z の計算

75~98: Z が境界値 Z_b より小さく且つ含水率が25%より小なる時は、粉の乾燥速度及び温度上昇は Eq. (78) 及び Eq. (81) にしたがう。しかし、 Z が Z_b より大きいときには Eq. (80) と Eq. (86) にしたがう。また含水率が25%より大なるときは、減率第一段に属すると考えられるので、後者と同じ形式の式

したがう。

99: 熱力学の第2法則により $R' < 0$ となることはないから、その場合 $R' = 0$ とする。これは実験式をつなぎ合わせて起る矛盾を防ぐ理論的制限条件である。

100~107: 乾燥によって空気中に吸収した水分が飽和度を越えないようにした制限

100 : Eq. (85) による H の計算

101 : Eq. (88) による I の計算

102 : Eq. (89) によ T_g の計算

103 : T_g に対する飽和蒸気圧を計算する。

104~105: 空気中に吸収した水分によって蒸気圧が飽和蒸気圧を越えたらその飽和蒸気圧に対応する絶対湿度とする。これらの計算をくり返し、矛盾が起らないようになつたら次に進む。

106~108: 加熱する空気の温度が加熱される物体の温度より低くなることはないから、そのような場合には、空気の温度は被加熱物体温度に等しくし、温度上昇をストップし、したがってエントロピ不変となり、蒸発量は被加熱物体温度すなわち初温 T_s に対応する値をとらなければならない。

109: いろいろの諸制限を満足させるために仮に用いた H2, I2, TG2 はここで条件を満足しているので、各各元の記号に戻す。

111~121: 配列 X を与えられた数 IN の数だけ横に印刷する手続き。

122: 計算の種類 J を読む。

124: 計算1種類終了毎に JJ が1多くなる。

133: 第 IN+1 番目の空気条件が与えられる時間は充分に大きくとる (実際には与えられない)。

134: 空隙率 f が与えられる。

135: 単位体積当りの表面積 a_p が与えられる。

137~138: 表題が記入される。

140~142: 粉の初期条件が印刷される。

146~155: 流入空気の各段階における条件が印刷される。

153~180: Eq. (29) を解き、 r と Z_b を求め印刷する手続き。ニュートン法を用いる。

181~197: 計算結果の種類 J の印刷

200: データの初期含水率は wet base なので dry base に換算。

201: 初期初温が与えられる。

- 202~206: 時間が与えられた時間に達したらそれに対応する乾燥空気の状態が与えられる。以後、次の時間に達するまでその条件で乾燥が行なわれる。
- 209~211: 時間と湿量基準含水率及び初温が印刷される。
- 213~214: 諸定数を計算し、相対湿度が99%を越えるようであれば乾燥能力はないから、そのままの状態で通過するのみ。
- 215~219: 薄層に分別した一層について基礎方程式を解き、それが最後の層でなかったら、そこで得られた値をもとに次の層の計算を行なう。
- 217: Eq. (90) 式の計算。
- 218: Eq. (91) 式の計算。
- 220~221: 全層の平均の乾燥と温度上昇が計算され、初めの含水率と温度が計算される。
- 222: 時間が Δt 進められる。
- 223~228: 最後の層を通過した空気の状態すなわち排気温度、絶対温度、相対湿度が印刷される。最後に Z が印刷される。
- 229~230: 時間が与えられた必要な全時間に達するまで、この計算は反復して行なわれ、時間に達したら次の印刷頁に移つて、次の種類の計算を行なう。
- 231~232: 与えられた種類の数、計算が完了するまで計算が行なわれ、終了する。

Nomenclature

- a : Semimajor axis of smaller model ellipse (m)
- a_e : Equivalent spheric radius (m)
- a_v : External area of solid particles of beds (m^2/m^3)
- B : Coefficient of the term in series
- b : Semimajor axis of larger model ellipse (m)
- C : Concentration (kg/m^3)
- c : Specific heat ($\text{kcal}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$)
- D : Diffusion coefficient (m^2/hr)
- E : Function of position vector
- F : Defined by Eq. (A-4) in Appendix
- F_0 : Defined by Eq. (22) (—)
- f : Fractional void in beds (—)
- $f(z)$: Function of Z , meaning a ratio of free moisture content to the initial free moisture content
- G : Superficial mass velocity of fluid ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$)
- GI : Geometry index (—)
- Gu : Mass flow per unit mass of solid or grain ($\text{kg}/\text{kg}\cdot\text{hr}$)
- H : Absolute humidity (kg/kg')
- h : Heat transfer coefficient of packed bed ($\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$)
- h' : Constant of heat transfer in Eq. (55) ($\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$)
- $I(t)$: Function of t defined by Eq. (80)
- i : Enthalpy (kcal/kg)
- j : Colburn j factor (—)
- K : Drying constant (hr^{-1})
- k : Constant in Eq. (43) ($^\circ\text{K}^{-1}$)
- k' : A constant in Eq. (42) (—)
- k_2 : Defined by Eq. (47)
- k_3 : Defined by Eq. (48)
- k_4 : Constant in Eq. (49) ($^\circ\text{K}$)
- L_1 : Defined by Eq. (78)
- L_2 : Defined by Eq. (79)
- L_3 : Defined by Eq. (81)
- l : Characteristic length or minimum axis of ellipse (m)
- l' : Temporary depth of drying grains for convenience (m)
- M : Moisture content, dry base (a decimal)
- M_e : Equilibrium moisture content, dry base (a decimal)
- m : Free moisture content, dry base (a decimal)
- N : Temporary local moisture content of grains for convenience of computation (a decimal)
- N_e : Temporary local equilibrium moisture content (decimal)
- N_s : Temporary local temperature of grains for convenience of computation ($^\circ\text{C}$)
- n : A exponent in Eq. (43)
- Pr : Prandtl number (—)
- R : Local drying rate (hr^{-1})
- R' : Local temperature rising rate ($^\circ\text{C}/\text{hr}$)
- Re : Reynolds number (—)

rh : Relative humidity (a decimal)
 S : Surface area of a particle (m^2)
 S : Surface region
 S' : Transformed surface region corresponding to x' , y' , z'
 T : Temperature ($^{\circ}C$)
 TK : Thermal conductivity ($kcal/m \cdot hr \cdot ^{\circ}C$)
 TT : Function of time
 t : Time (hr)
 V : Volume of a particle (m^3)
 x, y, z : Coordinate (m)
 x', y', z' : Dimensionless coordinates
 Z : Dimensionless time defined by Eq. (24)
 Z_0 : Value of Z determining boundary of adaptation of two different formulae
 α, β : Constant in Eq. (25) (—)
 r : Coefficient of the second term of Eq. (27')
 Δ : Finite difference
 λ : Eigenvalue
 ν : Kinematic viscosity (m^2/hr)
 ρ : Density (kg/m^3)
 σ : Latent heat of evaporation ($kcal/kg$)

Subscript

d : Dynamic
 g : Gas or air
 i : Ordinal number of the term in infinite series
 0 : Initial condition
 s : Solid or grain
 st : Static
 Δ : Value at $t + \Delta t$

文 献

- Allen, J. R. 1960 Application of grain drying theory to the drying of maize and rice. *J. Agric. Engng Res.*, 5(4): 363-385
- Becker, H. A. and H. R. Sallans 1955 A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel. *Cereal Chem.*, 32: 212-226
- Becker, H. A. 1959 A study of diffusion in solid of arbitrary shape with application to the drying of the wheat kernel. *J. Appl. Polym. Sci.*, 1(2): 222-226
- Boyce, D. S. 1965 Grain moisture and temperature changes with position and time during through drying. *J. Agric. Engng Res.*, 10(4): 333-341
- Clark, R. G. and W. J. Lamond 1968 Drying wheat in two feet beds I. *J. Agric. Engng Res.*, 13(2): 141-148
- Clark, R. G. and W. J. Lamond 1969 Drying wheat in two feet beds III. *J. Agric. Engng Res.*, 13(4): 323-331
- Crank, J. 1964 *The Mathematics of Diffusion*. Oxford Univ. Press, London
- DeAcetis, J. and G. Thodos 1960 Mass and heat transfer in flow of gases through spherical packing. *Ind. Eng. Chem.*, 52(12): 1003-1006
- 藤田重文 1956 化学工学 I. 岩波書店, 東京
- Henderson, S. M. 1952 A basic concept of equilibrium moisture. *Agric. Engineering*, 33(1): 29-32
- Henderson, S. M. and R. L. Perry 1955 *Agricultural Process Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., New York
- Henderson, S. M. and S. Pabis 1961 Grain drying theory, I. Temperature effect on drying coefficient. *J. Agric. Engng Res.*, 6(3): 169-173
- Henderson, J. M. and S. M. Henderson 1968 Computational procedure for deep-bed drying. *J. Agric. Engng Res.*, 13(2): 87-95
- 水谷嘉之, 杉田信之 1971 新版化学熱力学. 丸善, 東京, 245 頁
- Murata, S. 1971 Extension of Shumann's theory to the case of low thermal diffusivity of solid particles. *J. Chem. Eng. Japan*, 4(2): 140-146
- 村田敏 1973 a Schumannの式の展開とその農産物冷却に関する 2・3 の応用. 九大農学雑誌, 27 (3・4): 247-257
- 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, 8 頁
- 守安虎次 1964 空気調整工学第 5 版. 技報堂, 東京
- 農業施設小委員会 1968 八郎潟訓練所用カントリーエレベータの試験報告 (その 2) 昭和 47 年度八郎潟中央干拓地における耕地条件整備計画に関する報告. 農業土木学会, 139-171 頁
- 岡村俊民, 渡辺隆編 1969 昭和 43 年度自脱型コンバイン, 結束型動力刈取機の性能に関する試験成績. 北海道大学農学部農業機械学教室・北海道立中央農業試験場農業機械部, 札幌
- 大谷茂盛 1969 乾燥と伝熱. 機械の研究, 21(1): 129-139
- 大竹伝雄 1963 化学工学 III. 岩波書店, 東京, 18 頁
- Richey, C. B. ed. 1961 *Agricultural Engineers' Handbook*. McGraw-Hill, New York, pp. 664-667
- 芝亀吉 1950 熱力学. 岩波書店, 東京, 165-167 頁
- Smith, R. E., G. L. Nelson and R. L. Henrick-

- son 1967 Analysis of transient heat transfer from anomalous shapes. *Trans. ASAE*, 10 (2): 236-245
- Spencer, H. B. 1969 A mathematical simulation of grain drying. *J. Agric. Engng Res.*, 14 (3): 226-235
- 内田秀雄 1965 湿り空気と冷却塔第2版. 裳華房, 東京
- 渡辺鉄四郎, 清水浩 1951 籾の人工乾燥について. 農機誌, 12(3・4): 11-20
- 渡辺鉄四郎, 小川浄寿, 福田正光, 吉永昭, 伴敏三 1953 常温通風乾燥法に関する研究. 関東東山農業試験場報告第4号, 38-117頁
- Woodforde, J. and P. J. Lawton 1965 Drying cereal grain in beds six inches deep. *J. Agric. Engng Res.*, 10(2): 146-171
- 山下律也, 笈田昭 1966 籾の水分移行について. 農機誌, 27(4): 261-265
- 山沢新吾, 吉崎繁, 前川孝昭, 園部和彦 1970 農産物の乾燥における基礎的研究 (第1報): 穀類の乾燥における水分移行特性について. 農業機械学会第29回総会講演要旨, 4-4
- 山沢新吾, 吉崎繁, 前川孝昭, 園部和彦 1971 農産物の乾燥における基礎的研究 (第2報). 農機誌, 33(3): 279-287
- 横堀進, 久我修沢 1960 ギート基礎伝熱工学. 丸善, 東京, 324頁
- 全国農業構造改善協会編 1965 農業構造改善事業コンサルタントハンドブック農業機械編. 社団法人全国農業構造改善協会, 東京, 186-191頁

Summary

The rough-rice-drying process in a mixing type dryer was analysed by the theory of thin layer drying.

The drying period of rough rice in the dryer is assumed to be a pre-heating period, and a heat balance equation is introduced as one of the basic equations. The Becker's equation of moisture content, the Henderson's equation of equilibrium moisture content, and the equations of air and vapour characteristics are used for the analysis with a slight modification.

The drying process in mixing type dryer is assumed to be as folloes:

- 1) Drying air increase its humidity and reduces its temperature by absorbing the moisture of the products through the mixing layer from the inlet to the outlet. This means that the state of air changes with drying time and grain position as in deep stationary bed.
- 2) The state of grains is independent of their position, but dependent on drying time. This is due to constant mixing.
- 3) The drying rate of grains, averaged by constant mixing, is independent of their position although the local drying rate varies with their position.
- 4) The heating rate of grains is also independent of their position. This is the same situation as in the drying rate.

The equations on the misture content, the temperature of grains, the absolute humidity, and the enthalpy of drying air are being derived. The numerical method of solving these equations is given together with its computer program.

Results computed with this theory agree well with the measured values with the practical apparatus, L. S. U. type dryer.

Fig. 7. Program and input data.

```

189 OUTPUT(200,@@*RICE TEMP*@@)..
190 SPACE(4)..
191 OUTPUT(200,@@*AIR TEMP*@@)..
192 SPACE(2)..
193 OUTPUT(200,@@*AIR ABS HUM*@@)..
194 OUTPUT(200,@@*AIR RELAT HUM*@@)..
195 SPACE(10)..
196 OUTPUT(200,@@*Z*@@)..
197 CKLF.. CKLF.. CKLF..
198 TAU=0..
199 DY=1.0/N..
200 M=M0/(1.0-M0)..
201 TS=TS0..
202 HANP1.. EFOR I1=1 ESTEP 1 @UNIL IN
203 @DO @BEGIN @IF TAU @GO JIKAN(I1)
204 @AND TAU @LS JIKAN(I1+1) @THEN
205 @BEGIN COND(I1)..
206 @GO TO PIN @END @END ..
207 PIN .. NN=0..
208 RR=RR1=0..
209 OUTPUT1(200,@@B-.DDDD@-DDB@@TAU)..
210 OUTPUT1(200,@@B-.DDDD@-DDB@@M/(1.0+M)..
212 OUTPUT1(200,@@B-.DDDD@-DDB@@TS-273.16)..
213 HANP2.. FUN1.. @IF RH @GO .999 @THEN
214 @GO @TO TOP..
215 CAL..
216 NN=NN+1.0..
217 KK=RR+R*DY*DTAU..
218 KK1=RR1+R1*DY*DTAU..
219 @IF NN @LS N @THEN @GO @TO HANP2..
220 TOP.. M=M-KK..
221 TS=TS+RR1..
222 TAU=TAU+DTAU..
223 OUTPUT1(200,@@B-.DDDD@-DDB@@T@-273.16)..
224 OUTPUT1(200,@@B-.DDDD@-DDB@@H)..
225 OUTPUT1(200,@@B-.DDDD@-DDB@@RH*2)..
226 SPACE(5)..
227 OUTPUT1(200,@@B-.DDDD@-DDB@@Z)..
228 CKLF.. CKLF..
229 @IF TAU @LS TIME @THEN @GO @TO HANP1..
230 EJECT ..
231 @IF JJ @LS J @THEN @GO @TO
232 KUKI @END..

```

```

DATA
2
.02
1.2
.284 294.16
.1
.0166667 3.0
10.0
4
0 333.16 .0154 2.798
.6667 333.16 .0154 3.290
1.3333 327.16 .0154 2.672
2.0 327.66 .0154 3.970
.02
1.2
.30 299.66
.1
.01666667 3.0
10.0
4
0 323.46 .0154 3.638
.666667 318.66 .0154 3.732
1.33333 328.26 .0154 3.538
2.0 318.36 .0154 2.916

```

Fig. 7. Program and input data (continued).

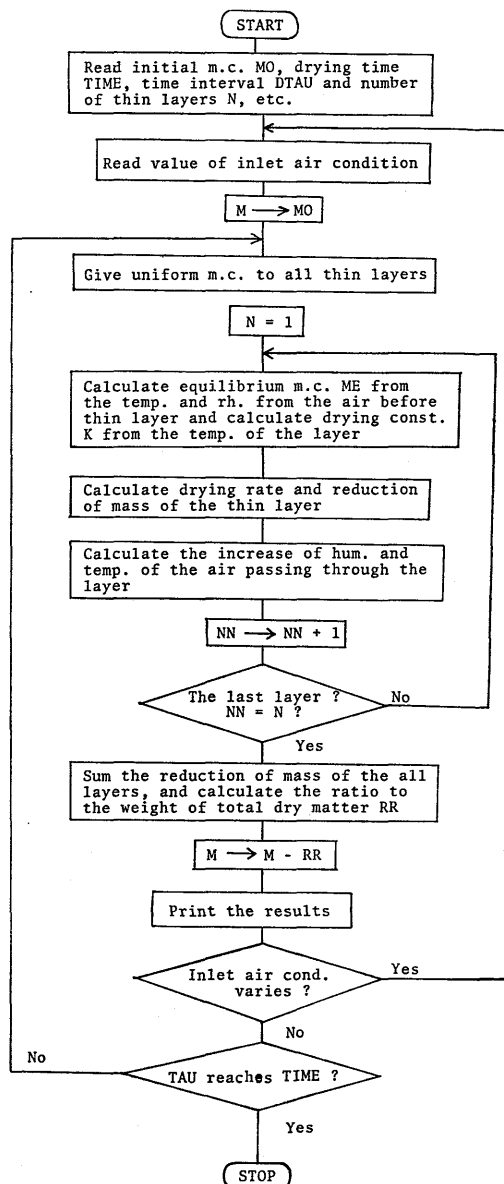


Fig. 8. Flow chart.