

# 玄米の乾燥における輸送現象 (2) — 粒内温度および含水率の計算 —

山口 信吉, 若林嘉一郎

## 緒 言

本来、乾燥は熱と物質の同時移動操作であり、被乾燥材料内部の輸送現象は非定常である。したがって、乾燥における輸送現象を厳密に解析するには非定常伝熱および物質移動に関する基礎偏微分方程式を連立させて解を求めなければならない。

本報では前報<sup>9)</sup>の実験結果に基づき、玄米粒の薄い層の通気乾燥における玄米粒内での輸送現象の解析を試みた。まず、熱および物質移動の基礎式を導き、それを解いて粒内温度を計算し、つぎに乾燥過程および貯蔵過程における粒内含水率の変化を計算した。

## 1. 基礎式

玄米粒を半径  $b$  なる均質な球とみなし、粒の収縮を無視する。最初粒内の温度および含水率はそれぞれ一様に  $T_i$  および  $w_i$  であるとし、その粒を一定条件の空気流中で乾燥する。乾燥中粒表面の含水率は不変の平衡値  $w_e$  となり (前報参照)、粒内の温度  $T$  および含水率  $w$  の分布は粒中心に関して対称性を保つと考える。

前報に示したように、玄米粒内の水分は含水率勾配に比例して拡散則に従って移動するとみなされ、半径座標  $r$  方向への水分流束  $N_w$  [kg/m<sup>2</sup>h] は次式で表される。

$$N_w = -(D/v) (\partial w / \partial r) \quad (1)$$

上式の  $D$  および  $v$  はそれぞれ有効拡散係数および基準の比容積であり、前報同様にそれらを定数 ( $D = 3.5 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/h,  $v = 0.672 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/kg (d.s.)) とおく。

### 1. 1 物質移動の基礎式

粒内の任意の微小球殻要素に関して式 (1) の拡散則に基づく物質収支より次の基礎式が得られる。

$$\frac{\partial w(r,t)}{\partial t} = \frac{D}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial w(r,t)}{\partial r} \right] \quad (2)$$

上式において、含水率  $w$  は半径座標  $r$  と時間  $t$  の関数であるから、含水率を  $w(r,t)$  と表現した。この場合の初期条件および境界条件は次のように表される。

$$[w(r,t)]_{t=0} = w_i \quad (3)$$

$$[\partial w(r,t)/\partial r]_{r=0} = 0 \quad (4)$$

$$[w(r,t)]_{r=b} = w_e \quad (5)$$

## 1. 2 熱移動の基礎式

著者らはすでに玄米の比熱  $C(w) = C_0 + C_w w$  (ただし  $C_0 =$  乾き玄米の比熱  $= 0.31 \text{ kcal/kg(d.s.)}$  °C,  $C_w =$  水の比熱  $= 1.0 \text{ kcal/kg(H}_2\text{O)}$  °C) および積分湿潤熱  $A(w) = 27[1 - \exp(-12w)]$  を得ている。<sup>5)</sup> これらを用いて玄米のエンタルピ  $H[\text{kcal/kg(d.s.)}]$  を定義する。

温度 0 °C の飽和水および乾き玄米を基準とすると, 含水率  $w$ , 温度  $T$  の湿り玄米のエンタルピ  $H$  は, 顕熱  $C(w)T$  と潜熱  $-A(w)$  (絶乾状想から含水率  $w$  の状態にまで吸水する際の発熱量, すなわち, 積分湿潤熱の負値) との和として次のように表すことができる。

$$H(T, w) = C(w)T - A(w) = (C_0 + C_w w)T - A(w) = (0.31 + w)T - 27[1 - \exp(-12w)] \quad (6)$$

粒内部にエンタルピ勾配があるとき, 次式によってエンタルピ流束  $E[\text{kcal/m}^2\text{h}]$  が表されるものと考えられる。

$$E = -K[\partial H(T, w)/\partial r] \quad (7)$$

上式の比例係数  $K[\text{kg(d.s.)/mh}]$  は熱伝導における熱伝導率に対応するものであり, 以下にその  $K$  の内容を検討する。エンタルピ勾配の演算を進めて式(6)を適用すると次のようになる。

$$E = -K \left[ \frac{\partial H(T, w)}{\partial T} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} + \frac{\partial H(T, w)}{\partial w} \frac{\partial w(r, t)}{\partial r} \right] \\ = -K \left\{ C(w) \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} + [C_w T - A'(w)] \frac{\partial w(r, t)}{\partial r} \right\}$$

ここに,  $A'(w) = \partial A(w)/\partial w = 324 \exp(-12w)$  は微分湿潤熱である。上式で  $K = k/C(w)$  とおくと

$$E = -k \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} - \frac{kv[C_w T - A'(w)]}{DC(w)} \left( \frac{D}{v} \right) \frac{\partial w(r, t)}{\partial r} \quad (8)$$

ただし,  $k$  は粒の熱伝導率  $= 0.31 \text{ kcal/mh } ^\circ\text{C}$  である。上式の右辺第1項は熱伝導による顕熱移動速度を表し, 第2項は拡散水分に伴う熱の移動速度を表す。すなわち,  $K = k/C(w)$  とおくことにより, 式(7)の意味が明確になった。

式(7)に基づく, 粒内微小球殻要素のエンタルピ収支は次式で表される。

$$\frac{\partial H(r, t)}{\partial t} = \frac{v}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 K \frac{\partial H(r, t)}{\partial r} \right] \quad (9)$$

上式左辺の微分演算を進めて再び式(6)を適用し, 右辺に式(8)を代入すると次式が得られる。

$$C(w) \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} + [C_w T - A'(w)] \frac{\partial w(r, t)}{\partial t} = \frac{v}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 k \left[ \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} + \frac{C_w T - A'(w)}{C(w)} \frac{\partial w(r, t)}{\partial r} \right] \right\}$$

上式に式(2)を代入し,  $\alpha$  (温度伝導度)  $= kv/C(w)$  とおいて整理すると次の基礎式が得られる。

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \frac{\alpha(w)}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] + \frac{\psi_1(T, w)}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial w(r, t)}{\partial r} \right] \\ - \psi_2(T, w) \left[ \frac{\partial w(r, t)}{\partial r} \right]^2 + \psi_3(w) \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \frac{\partial w(r, t)}{\partial r} \quad (10)$$

ただし,  $\psi_1(T; w) = \frac{[C_w T - A'(w)][\alpha(w) - D]}{C(w)}$

$$= [T - 324 \exp(-12w)] \left[ \frac{2.08 \times 10^{-4}}{(0.31 + w)^2} - \frac{3.50 \times 10^{-6}}{0.31 + w} \right] \quad (11)$$

$$\begin{aligned}\psi_2(T, w) &= [\alpha(w)/c(w)] \{A''(w) + [c_w/c(w)] [c_w T - A'(w)]\} \\ &= [2.08 \times 10^{-4}/(0.31+w)^2] \{-3.89 \times 10^3 \exp(-12w) + \\ &\quad [T - 324 \exp(-12w)]/(0.31+w)\} \quad (12)\end{aligned}$$

$$\psi_3(w) = \alpha(w)C_w/C(w) = 2.08 \times 10^{-4}/(0.31+w)^2 \quad (13)$$

式(12)の $A''(w)$ は $\partial^2 A(w)/\partial w^2 = \partial A'(w)/\partial w = -3.89 \times 10^3 \exp(-12w)$ である。

式(3)～(5)のほかに次の初期条件および境界条件が与えられる。

$$[T(r, t)]_{t=0} = T_i \quad (14)$$

$$[\partial T(r, t)/\partial r]_{r=0} = 0 \quad (15)$$

$$\begin{aligned}-k \left[ \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right]_{r=b} - \frac{\alpha(w_e)C_w [T(r, t)]_{r=b} - D\lambda(T_f) - [\alpha(w_e) + D] A'(w_e)}{v} \\ \times \left[ \frac{\partial w(r, t)}{\partial r} \right]_{r=b} = h \{ [T(r, t)]_{r=b} - T_f \} \quad (16)\end{aligned}$$

ここに、粒表面（ $r = b$ ）における境界条件を表す上の式(16)は次のように導かれる。粒内部から粒表面に到達する熱量 $q_1$  [kcal/h] は式(7), (8)より次のように得られる。

$$q_1 = -4\pi b^2 K \left[ \frac{\partial H(r, t)}{\partial r} \right]_{r=b} = -4\pi b^2 k \left\{ \left[ \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right]_{r=b} + \frac{C_w T - A'(w_e)}{C(w_e)} \left[ \frac{\partial w(r, t)}{\partial r} \right]_{r=b} \right\} \quad (17)$$

一方、粒表面から空気中に出る熱量 $q_2$  [kcal/h] は、熱伝達による顕熱移動量 $4\pi b^2 h \{ [T(r, t)]_{r=b} - T_f \}$ と粒表面に到達した水分 $-4\pi b^2 (D/v) [\partial w(r, t)/\partial r]_{r=b}$ の気化熱との和となる。表面（含水率 $w_e$ ）における単位水分量の気化熱は、微分湿潤熱 $A'(w_e)$ （含水率 $w_e$ の状態の水を飽和水の状態にするに要する熱量）と飽和水の蒸発潜熱 $\lambda \{ [T(r, t)]_{r=b} \} = \lambda(T_f)$ の和として表される。したがって $q_2$ は

$$q_2 = 4\pi b^2 h \{ [T(r, t)]_{r=b} - T_f \} - 4\pi b^2 [A'(w_e) + \lambda(T_f)] (D/v) [\partial w(r, t)/\partial r]_{r=b} \quad (17')$$

ここで、 $q_1 = q_2$  とおいて整理すると式(16)が得られる。

## 2. 基礎式の解法

### 2.1 物質移動の基礎式の解法

乾燥中における有効拡散係数 $D$ と平衡含水率 $w_e$ を定数とおくと、式(3)～(5)の条件下における式(2)の解は次のようになる。<sup>3)</sup>

$$w(r, t) = w_e + \frac{2b(w_e - w_1)}{\pi r} \sum_{N=1}^{\infty} \frac{(-1)^N}{N} \sin\left(\frac{N\pi r}{b}\right) \exp\left(-\frac{N^2 \pi^2 D t}{b^2}\right) \quad (18)$$

ただし、粒中心（ $r = 0$ ）では次のように表される。

$$[w(r, t)]_{r=0} = w_e + 2(w_e - w_1) \sum_{N=1}^{\infty} (-1)^N \exp\left(-\frac{N^2 \pi^2 D t}{b^2}\right) \quad (19)$$

上記のほかに誤差関数を用いた解もある<sup>3)</sup>が、ここでは省略する。

2. 2 熱移動の基礎式の解法

式(10)の解析解を見出すことができないので、同式の階差表現による数値解法を示す。半径座標  $r$  の区間  $0$  から  $b$  までの間を  $m$  等分し第  $i$  番目 ( $i=0,1,2,\dots, m$ ) に当る地点の座標を  $r_i$  と表す。その刻み  $b/m$  を  $\Delta r$  とすると  $r_i=i \Delta r$  となる。また、時間刻みを  $\Delta t$  とし、乾燥開始時刻より第  $j$  番目 ( $j=0,1,2,\dots$ ) に当る時点の時間座標を  $t_j=j \Delta t$  と表す。すると式(10)より次の関係が得られる。

$$T(r_i, t_{j+1}) = \left\{ 1 - \frac{2 \Delta t \alpha [w(r_i, t_j)]}{\Delta r^2} \right\} T(r_i, t_j) + \frac{\Delta t \alpha [w(r_i, t_j)]}{\Delta r^2} \left[ \frac{r_{i+1}}{r_i} T(r_{i+1}, t_j) + \frac{r_{i-1}}{r_i} \right. \\ \times T(r_{i-1}, t_j) \left. \right] + \frac{\Delta t \psi_1 [T(r_i, t_j), w(r_i, t_j)]}{\Delta r^2} \left[ \frac{r_{i+1}}{r_i} w(r_{i+1}, t_j) + \frac{r_{i-1}}{r_i} w(r_{i-1}, t_j) - 2w(r_i, t_j) \right] \\ - \frac{\Delta t \psi_2 [T(r_i, t_j), w(r_i, t_j)]}{4 \Delta r^2} \left[ w(r_{i+1}, t_j) - w(r_{i-1}, t_j) \right]^2 \\ + \frac{\Delta t \psi_3 [w(r_i, t_j)]}{4 \Delta r^2} [T(r_{i+1}, t_j) - T(r_{i-1}, t_j)] [w(r_{i+1}, t_j) - w(r_{i-1}, t_j)] \quad (20)$$

式(18), (19)よりすべての地点および時刻における含水率が求められる。したがって、時刻  $t_j$  における温度分布  $T(r_i, t_j)$  が既知ならば上式よりその  $\Delta t$  後の時刻  $t_{j+1}$  における温度分布  $T(r_i, t_{j+1})$  が得られることになる。ただし、粒中心 ( $r_0$ ) および粒表面 ( $r_m$ ) の値  $T(r_0, t_{j+1})$  および  $T(r_m, t_{j+1})$  はそれぞれ以下に述べる式(21)および(22)で与えられる。

式(4)および(15)の条件より、粒中心 ( $r=0$ ) では式(10)は次のように表される。

$$\left[ \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} \right]_{r=0} = \left\{ 3 \alpha [w(r, t)] \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} \right\}_{r=0} + \left\{ 3 \psi_1 [T(r, t), w(r, t)] \frac{\partial^2 w(r, t)}{\partial r^2} \right\}_{r=0}$$

上式を階差表現して整理すると次式が得られる。

$$T(r_0, t_{j+1}) = \left\{ 1 - \frac{6 \Delta t \alpha [w(r_0, t_j)]}{\Delta r^2} \right\} T(r_0, t_j) + \frac{6 \Delta t \alpha [w(r_0, t_j)]}{\Delta r^2} T(r_1, t_j) \\ + \frac{6 \Delta t \psi_1 [T(r_0, t_j), w(r_0, t_j)]}{\Delta r^2} [w(r_1, t_j) - w(r_0, t_j)] \quad (21)$$

一方、粒表面 ( $r=r_m=b$ ) 近傍の区間  $r_{m-2} \leq r \leq r_m$  において温度  $T$  および含水率  $w$  が  $r$  の 2 次式で表されるとみなすと、式(16)より次の関係が得られる。

$$T(r_m, t_{j+1}) = \frac{\left[ \{(D/v)\lambda(T_f) + [\alpha(w_e) - D][A'(w_e)/v]\} [w(r_{m-2}, t_{j+1}) - 4w(r_{m-1}, t_{j+1}) + 3w(r_m, t_{j+1})] + 2 \Delta rh T_f + k[4T(r_{m-1}, t_{j+1}) - T(r_{m-2}, t_{j+1})] \right]}{2 \Delta rh + 3k + \alpha(w_e)(C_w/v) [w(r_{m-2}, t_{j+1}) - 4w(r_{m-1}, t_{j+1}) + 3w(r_m, t_{j+1})]} \quad (22)$$

3. 温度変化の測定値と計算値

玄米粒の長軸に沿って0.4mmのドリルで穴をあけ、その穴に0.1mmのクロメル・アルメル熱電対素線を通して接点を粒中心に接着剤(アラルダイト)で固定した。この試料粒を玄米粒群とともに定温(15℃)の密閉容器内に2日間放置し、その玄米粒群の含水率測定値0.19kg/kg(d.s.)を試料粒の含水率とみなした。

試料粒子(初期含水率  $w_1=0.19$ , 初期温度  $T_1=15^\circ\text{C}$ )を温度  $T_f=41^\circ\text{C}$ , 関係温度11%, 流速  $u_f=62\%$ の空気流中に入れて温度変化を測定した。測定値を粒中心温度  $T(r_0, t)$  とみなし、無次元温度

$\theta = [T(r_0, t) - T_i] / (T_f - T_i)$  を求めてそれを図1に○印でプロットした。

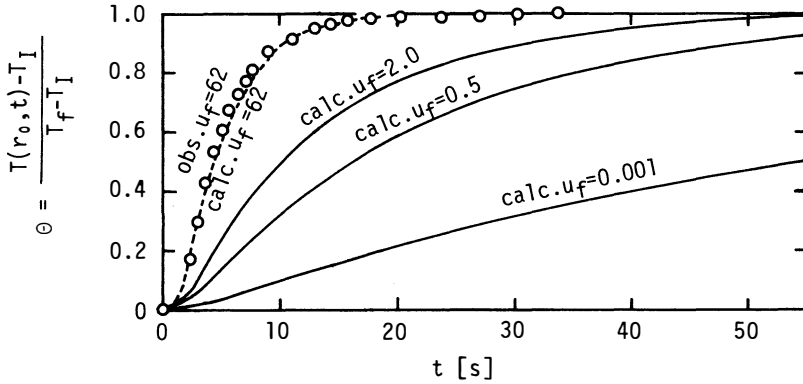


図1 乾燥過程における玄米粒中心温度の測定値（プロット）と計算値

この実験と同じ条件を設定し、式(20)～(22)を用いて粒内温度の変化を計算した（富山大学電算機FACOM230-55Sを使用）。計算結果より、粒中心の無次元温度 $\theta$ を求め、それを図1に破線で示した。図より、測定値と計算値の一致は良好と認められる。これは本報の解析法が妥当であることを示すものであろう。

同条件下で空気流速だけを2.0, 0.5および0.001 %に変えて同様の計算を行った。それらの結果を図1に実線の曲線で示し、各曲線に $u_f$ の値を記載した。この結果より、前報の実験<sup>9)</sup>における空気流速範囲 $0.5 \leq u_f \leq 2.0$  %では、乾燥開始後1分程度経過すると粒の中心部も空気温度にほぼ等しくなることがわかる。この温度上昇時間は乾燥所要時間（1 h以上）にくらべて十分小さく、この場合、粒内を常に空気温度に等しい等温系と置く近似が許される。

電気恒温乾燥器（自然対流式）内でもみ<sup>2)</sup>および小麦<sup>4)</sup>を加熱乾燥した報告によると粒温度の上昇に1 h程度の時間を要する。しかるに、自然対流を想定した $u_f=0.001$  %の計算結果（図1）によると、0.1 h程度で粒温度は空気温度に接近する。この時間の差違の原因は、計算値は薄い層の乾燥を想定しているのに対し、文献における測定条件は厚い層であったことにあると思われる。

#### 4. 乾燥過程および乾燥後の貯蔵過程における玄米粒内含水率分布

米は通常テンパリング乾燥と呼ばれる方法で乾燥される。それは、ある時間乾燥したのち乾燥を休止して一時貯蔵しておき再び乾燥するという操作を繰り返す間欠乾燥法である。ここでは、玄米のテンパリング乾燥を想定して乾燥過程および乾燥後の貯蔵過程における粒内含水率変化を検討する。

乾燥過程における解についてはすでに式(18), (19)に示した。乾燥後の貯蔵過程でも粒内水分移動の基礎式は式(2)で与えられるものとする。貯蔵前の乾燥期間を $\tau$  (h)と置くと、貯蔵過程の初期 ( $t = \tau, t - \tau = 0$ ) 条件は $\tau$  時間の乾燥によって粒内に形成された含水率分布 $f(r, \tau)$ として次のように与えられる。

$$f(r, \tau) = w_e + \frac{2b(w_e - w_1)}{\pi r} \sum_{N=1}^{\infty} \frac{(-1)^N}{N} \sin\left(\frac{N\pi r}{b}\right) \exp\left(-\frac{N^2 \pi^2 D \tau}{b^2}\right) \quad (23)$$

粒中心ではこの場合も式(4)の条件が成立する。貯留槽内では粒子から空隙への水分の移動量はわずかと考えられ、それを無視小と置くと粒表面における条件は次のように与えられる。

$$[\partial w(r, t) / \partial r]_{r=b} = 0 \quad (24)$$

式(23), (4)および(24)の条件において基礎式(式(2))の解は次のように得られている。<sup>1)3)</sup>

$$w(r, \tau, t) = \Phi(\tau) + \frac{4b(w_1 - w_e)}{r} \sum_{N=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{\beta_N^2 D(t - \tau)}{b^2}\right] \frac{\sin(\beta_N r/b)}{\sin\beta_N} \Gamma(\tau, N) \quad (25)$$

ただし、粒中心では次式となる。

$$[w(r, \tau, t)]_{r=0} = \Phi(\tau) + 4(w_1 - w_e) \sum_{N=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{\beta_N^2 D(t - \tau)}{b^2}\right] \frac{\Gamma(\tau, N)}{\cos\beta_N} \quad (26)$$

ここに、 $\beta_N$  は次の方程式のN番目の正根である。

$$\tan \beta_N = \beta_N \quad (27)$$

また、 $\Phi$  および  $\Gamma$  は次のように与えられる。

$$\Phi(\tau) = w_e + \frac{6(w_1 - w_e)}{\pi^2} \sum_{N=1}^{\infty} \frac{1}{N^2} \exp\left(-\frac{N^2 \pi^2 D \tau}{b^2}\right) \quad (28)$$

$$\Gamma(\tau, N) = \sum_{L=1}^{\infty} \frac{\exp(-L^2 \pi^2 D \tau / b^2)}{L^2 \pi^2 \beta_N^2} \quad (29)$$

次に、含水率分布の計算例を示す。初期含水率  $w_1 = 0.271$  の玄米を平衡含水率  $w_e = 0.134$  の条件で乾燥すると、式(18), (19)より得られる乾燥過程の玄米粒内含水率分布の計算結果は図2のようになる。図の曲線上に乾燥時間[h]を数字で示してある。乾燥時期  $\tau$  を 3.0 hにとると、式(25), (26)より貯蔵過程における計算結果は図3のようになる。図の曲線上には貯蔵開始後の経過時間[h]を示した。

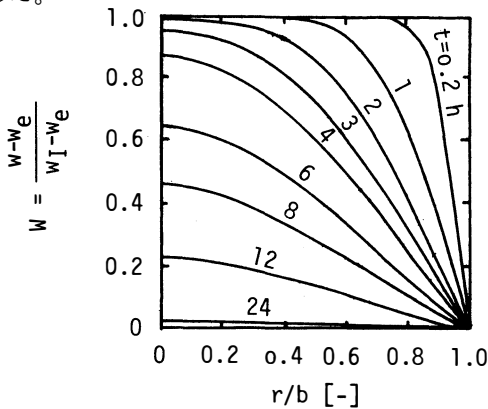


図2 乾燥過程における玄米粒内の含水率分布

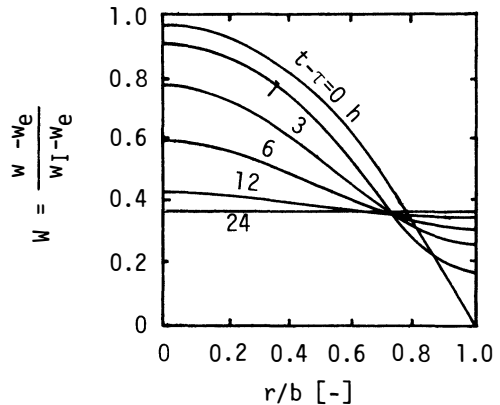


図3 乾燥期間  $\tau = 3.0$  h 後の貯蔵過程における含水率分布

図2によると、乾燥開始後2~3 hで粒中心の含水率が明らかに低下する。それ以前に粒表面付近の応力はすでに緩和していると考えれば、このときの粒中心の含水率低下に伴う収縮は中心部に引張り応力を誘発し、そこに割れ目が発生しやすくなる。この考察は割れの観察結果<sup>8)</sup>の傾向と一致する。また、図3によると、貯蔵開始後粒中心部の含水率は低下すると同時に粒表面の含水率はすみやかに上昇する。そのため、貯蔵を開始すると粒内部の引張り応力は粒表面部の膨張によって増大し、内部割れの発生が促進されるのであろう。この考察も割れの観察結果<sup>8)</sup>によって支持される。

### 結 言

前報に示した実験結果に基づき、玄米の乾燥における輸送現象を解析的に検討した。玄米を均質な球とみなし、その乾燥を熱と物質の同時移動現象として粒内温度変化を計算した結果、計算値と測定

値はほぼ一致した。この解析により、空気速度が 0.5%以上であれば粒内の温度変化はすみやかであり、通常の薄い層の通気乾燥では粒内を空気温度に等しい等温系とみなしてよいことを示した。

乾燥過程および乾燥後の貯蔵過程における玄米粒内含水率変化を計算し、計算結果より推察される内部応力の変化が著者らの割れの観察結果の傾向に合致することを認めた。

### 使用記号

$b$	: 球相当半径 = $1.44 \times 10^{-3}$	[m]
$C, C_0$	: 湿り玄米の比熱 = $C_0 + C_w w = 0.31 + w$ , 乾き玄米の比熱 = 0.31	[kcal/kg(d.s.)°C]
$C_w$	: 水の比熱 = 1.0	[kcal/kg(H <sub>2</sub> O)°C]
$D$	: 有効拡散係数 = $3.5 \times 10^{-8}$	[m <sup>2</sup> /h]
$E$	: エンタルピ流束	[kcal/m <sup>2</sup> h]
$f$	: 式(23)で与えられる関数	[kg/kg(d.s.)]
$H$	: 式(6)で定義される湿り玄米のエンタルピ	[kcal/kg(d.s.)]
$h$	: 玄米表面・空気流間の伝熱係数	[kcal/m <sup>2</sup> h°C]
$K$	: 式(7)の係数 = $k/C$	[kg(d.s.)/mh]
$k$	: 熱伝導度 = 0.31	[kcal/mh°C]
$N_w$	: 物質移動流束	[kg/m <sup>2</sup> h]
$r$	: 半径座標	[m]
$T, T_i$	: 玄米粒内部温度, 玄米粒内部初期温度	[°C]
$T_f$	: 空気温度	[°C]
$t$	: 時間	[h]
$u_f$	: 空気流速	[m/s]
$v$	: 乾き玄米の比容積 = 0.672	[m <sup>3</sup> /kg(d.s.)]
$W$	: 無次元含水率 = $(w - w_e)/(w_1 - w_e)$	[—]
$w$	: 含水率	[kg/kg(d.s.)]
$w_e, w_1$	: 平衡含水率, 初期含水率	[kg/kg(d.s.)]
$\alpha$	: 温度伝導度 = $kv/C$	[m <sup>2</sup> /h]
$\beta_N$	: 式(27)のN番目の正根	[—]
$\Gamma$	: 式(29)で与えられる関数	[—]
$\theta$	: 無次元温度 = $[T(r_0, t) - T_i]/(T_f - T_i)$	[—]
$A$	: 積分湿潤熱 = $27[1 - \exp(-12w)]$	[kcal/kg(d.s.)]
$A'$	: 微分湿潤熱 = $\partial A / \partial w = 324 \exp(-12w)$	[kcal/kg(H <sub>2</sub> O)]
$A''$	: $A'' = \partial^2 A / \partial w^2 = \partial A' / \partial w = -3.89 \times 10^3 \exp(-12w)$	[kcal kg(d.s.)/kg <sup>2</sup> (H <sub>2</sub> O)]
$\lambda$	: 水の蒸発潜熱	[kcal/kg(H <sub>2</sub> O)]
$\tau$	: 貯蔵前の乾燥期間	[h]
$\phi$	: 式(28)で与えられる関数	[kg/kg(d.s.)]
$\psi_1$	: 式(11)で与えられる関数	[kg(d.s.)m <sup>2</sup> °C/kg(H <sub>2</sub> O)h]
$\psi_2$	: 式(12)で与えられる関数	[kg <sup>2</sup> (d.s.)m <sup>2</sup> °C/kg <sup>2</sup> (H <sub>2</sub> O)h]
$\psi_3$	: 式(13)で与えられる関数	[kg(d.s.)m <sup>2</sup> /kg(H <sub>2</sub> O)h]

参 考 文 献

- 1) Carslaw, H. S., J. C. Jaeger: "Heat Conduction in Solid", 2nd ed., Oxford Univ. Press (1959)
- 2) 中馬豊, 村田敏, 岩元陸夫: 穀類の乾燥に関する基礎的実験, 農業機械学会誌, **31**, 250(1969)
- 3) Crank, J.: "The Mathematics of Diffusion", Oxford at the Clarendon Press (1956)
- 4) Pabis, S., S. M. Henderson: Grain Drying Theory III, J. Agric. Engng Res., **7**, 21 (1962)
- 5) 山口信吉, 若林嘉一郎: 玄米の比熱と湿潤熱, 農業機械学会33回総会講演要旨, P. 138(1974)
- 6) 山口信吉, 若林嘉一郎, 館谷敏泰, 柴田利治: 玄米の熱伝導度, 昭和51年度農業機械学会関東支部会講演要旨, P. 12 (1976)
- 7) 山口信吉, 若林嘉一郎, 細野八郎: 米粒の含水率による容積変化特性, 農業機械学会誌, **39**, 179 (1977)
- 8) 山口信吉, 山沢新吾, 若林嘉一郎, 堀内恵造: 米粒内部応力割れ発生に関する実験的研究(3), 農業機械学会誌, **42**, 397 (1980)
- 9) 山口信吉, 若林嘉一郎: 富山大学工学部紀要, **37**, 19 (1986)



# Transport Phenomena for Drying of Brown Rice Kernel(2) —Calculations of Temperature and Moisture Content of Brown Rice Kernel—

Shinkiichi YAMAGUCHI and Kaichiro WAKABAYASHI

## Summary

Based on the experimental results of the previous paper, the transport phenomena for drying of a brown rice kernel were analytically discussed by assuming the kernel to be a homogeneous sphere.

The fundamental differential equations of moisture and heat transport in a brown rice kernel were numerically analyzed during drying process. It was found that the calculated temperature of the brown rice kernel agreed well with experimental results.

Changes of moisture distributions in a brown rice kernel were calculated during drying and preserving processes. It was recognized that the observed changes of cracked rice percentage could be explained with the calculated moisture distributions during the both processes.

[英文和訳]

## 玄米の乾燥における輸送現象(2) —粒内温度および含水率の計算—

山口 信吉, 若林嘉一郎

前報の実験結果に基づき、玄米粒子を均質な球とみなして粒内における輸送現象を解析的に検討した。乾燥過程における玄米粒子内の物質および熱の移動に関する基礎微分方程式を数値的に解析した。粒内における温度の計算結果と実験値がほぼ一致することを見出した。

乾燥過程および貯蔵過程における玄米粒子内の含水率分布の変化を求めた。その計算結果によって両過程における割れ粒率の観測結果が説明できることを認めた。

(1986年10月31日受理)