

籾の乾燥プロセス

農産物の乾燥の目的

変質防止，貯蔵性や加工性の向上

乾燥とは

物質から水分を除去すること。

常温または加熱された空気を農産物中に送り込んで，水分蒸発に必要な熱量を供給し，蒸発した水蒸気を除去する操作である。

水分含量(moisture content)の表示

湿量基準含水率 M_w (wet basis, w.b. %)と，乾量基準含水率 M_d (dry basis, d.b. %)が用いられる。 M_w を水分， M_d を含水率と区分している。理論計算には，含水率 M_d (d.b.) を使う。

$$M_w = \frac{W_w}{W_w + W_d} \times 100 \quad [\text{w.b.}\%]$$

$$M_d = \frac{W_w}{W_d} \times 100 \quad [\text{d.b.}\%] \quad (1)$$

W_w : 水分重, W_d : 乾物重

水分測定法

水分重 W_w ，乾物重 W_d は，乾燥前重量 $W_w + W_d$ と絶乾状態の重量 W_d を測定することによって求めることができる。農業機械学会では，絶乾重量 W_d の基準測定法として，135℃，24 時間乾燥法を定めている。乾燥前後の重量を直接計測するこの方法では，測定にかなりの時間を要するので，水分含量によって変化する電気抵抗や誘電率などの物性値をとらえる間接法が広く採用されている。本実験では，単粒水分計という装置により籾の水分を湿量基準(w.b.)で測定可能。この装置は，水分含量と電気抵抗との関係を利用して

乾燥特性曲線

乾燥特性曲線は，材料の含水率と乾燥速度の関係を示したもの。この曲線は，一般に次の3つに分けられる (図1参照)。

- ① 材料の予熱期間… 材料温度が熱風の湿球温度に近接するまで上昇する間で，乾燥速度は徐々に上昇する
- ② 恒率乾燥期間(constant rate of drying)… 材料の表面が水膜で覆われ，理論的には材料温度が一定で，熱量はすべて水分蒸発に消費され，単位面積当たりの乾燥速度は一定となる。
- ③ 減率乾燥期間(decreasing rate of drying)… 表面の水分がなくなり，内部水分の表

面への移動が蒸発量に追いつかず、乾燥速度が逐次減少する期間で、熱量は蒸発水分潜熱と材料温度上昇の顕熱として消費される。最後には送風空気条件に対応する平衡含水率に達する。農産物は材料によっても異なるが、恒率乾燥する期間は非常に短く、ほとんど減率乾燥であるといわれている。

限界含水率と自由含水率

限界含水率(critical moisture content)・・・

恒率乾燥と減率乾燥の境界に相当する含水率。

自由含水率・・・

乾燥期間中の任意の含水率から平衡含水率の値を差し引いたもの ($M_d - M_e$ ，以下の乾燥方程式を参照)。

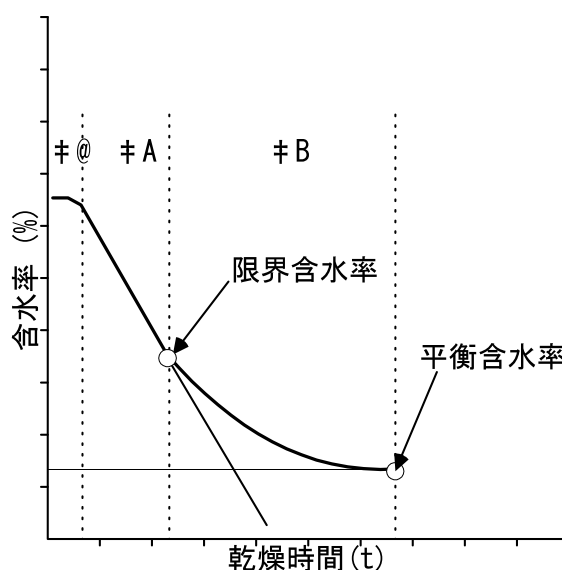


図 1 乾燥特性曲線

乾燥速度方程式

減率乾燥期間において乾燥速度が自由含水率に比例する部分としない部分があり、前者を減率第1段、後者を減率第2段と呼び、区分している。しかし、**乾燥速度は自由含水率に比例して減少する**とした計算例が多く見受けられる。

$$\frac{dM_d(t)}{dt} = k(M_d(t) - M_e) \quad (2)$$

平衡含水率 (M_e [mmHg])

材料は、温度・湿度の一定な空气中に長時間放置すると、ある一定の水分含量に落ち着き、その空気条件と平衡状態に達する。この時の水分含量を平衡含水率 M_e (equilibrium moisture content) と呼ぶ。この平衡含水率は、空気の温度が高くなると低くなり、また空気の相対湿度が増すと高くなる。精度の高い平衡含水率曲線を示す実験式としては、次式(3)が使用される。この他、式(4)によって、平衡含水率を計算し

た例もある。

Strohman の式

$$\ln\left(\frac{p}{p_s}\right) = a \exp(b M_e) \ln P_s + c \exp(d M_e)$$

糸の場合： (3)

$$a = 0.68, \quad b = -0.114, \quad c = -7.63, \quad d = -0.144$$

Henderson の式

$$1 - \Phi = \exp\left(-2.32 \times 10^{-5} T M_e^{2.0}\right) \quad (4)$$

ただし、

M_e : 平衡含水率 [d.b.%], p : 湿り空気の水蒸気分圧 [mmHg], p_s : 飽和蒸気圧

[mmHg], $\Phi = \left(\frac{p}{p_s}\right)$: 相対湿度, T : 湿り空気温度 [K]

籾の乾燥実験

1. 目的

籾の乾燥特性曲線を求め、これを解析する。

2. 乾燥実験

2-1 装置概略

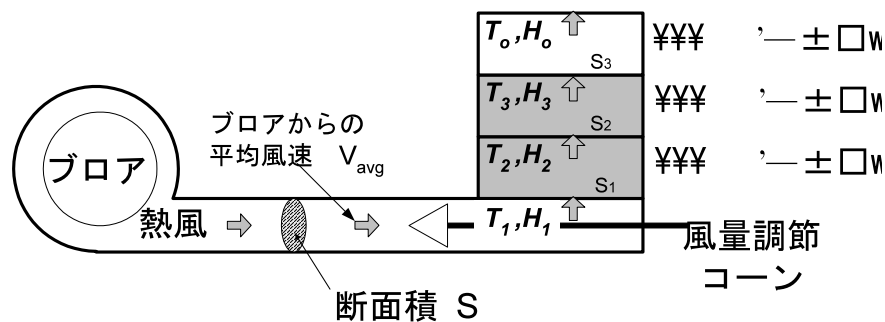


図 2 実験装置

2-2 測定項目

(1) 木箱の寸法と重さ

木箱内枠断面積[m²] : S_1, S_2, S_3

木箱重量[g] : $W_{box1}, W_{box2}, W_{box3}$

籾投入後の木箱重量[g] : $W_{(box+rice)1}, W_{(box+rice)2}, W_{(box+rice)3}$

(2) 単粒水分計による乾燥前の初期水分値(w.b.%) :

$M_{w1}(0), M_{w2}(0), M_{w3}(0)$

(3) ダクト内径 d [m] :

ノギスにより内径を測定 (図 3 参照)。

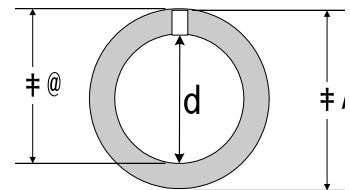


図 3 ダクト内径測定

(4) ダクト内の最大風速 V_{max} [m/s] :

熱線風速計を使用し、ダクト内中央付近の最大風速を計測する。

(5) 各時間の各層の入気温度 $T(t)$ [k] ・湿度 $H(t)$ [%] :

$(T(t)_1, H(t)_1), (T(t)_2, H(t)_2), (T(t)_3, H(t)_3)$

(6) 各時間の木箱の重量 $W_{box+rice}(t)$ [g] :

$$W_{(box+rice)1}(t), W_{(box+rice)2}(t), W_{(box+rice)3}(t)$$

2-3 計算項目

(1) 各層の初期重量[g] : $W_{rice}(0) = W_{(rice+box)}(0) - W_{box}$

$$W_{rice1}(0), W_{rice2}(0), W_{rice3}(0)$$

(2) 籾の絶乾重量[g] : W_{d1}, W_{d2}, W_{d3}

初期水分値 $M_{w1}(0), M_{w2}(0), M_{w3}(0)$ から計算

(3) 籾層初期の水分含量[g] : $W_{w1}(0), W_{w2}(0), W_{w3}(0)$

$$W_{rice} = W_d + W_w \text{ より.}$$

(4) 各時間の籾の含水率[d.b. %] ^(注意) : $M_{d1}(t), M_{d2}(t), M_{d3}(t)$

式 (1) 参照.

(5) 平衡含水率 M_e [d.b. %]

ブローアからの入気空気温度・湿度 (T_1, H_1) を使用して, Strohman と Henderson のモデル式により平衡含水率を求める.

(6) 理論乾燥曲線を計算し, 実験結果とあわせてグラフ表示する.

乾燥速度方程式である式 (2) の微分方程式を解くことによって, $M_d(t) = f(t)$ の形に変形可能. 回帰計算によって変数 k を求め, 乾燥曲線を描く.

(7) 平均風速 $V_{avg}, V_{1avg}, V_{2avg}, V_{3avg}$ [m/s], および風量 Q_{avg} [m³/s]

ダクト管内の風速は, 熱線風速計を用いて測定し, その平均風速 V_{avg} を, 管内の気流が乱流であると仮定し, (5) 式によって近似する.

$$V_{avg} = V_{max} \times 0.83 \quad (5)$$

各層へ流入する空気の平均風速 $V_{1avg}, V_{2avg}, V_{3avg}$ は, 風量 Q_{avg} を各層の断面積 S_1, S_2, S_3 で割ることによって求めることができる.

風量 Q_{avg} は, (6) 式によって計算する.

$$Q_{avg} = (\text{ダクト管の内径の断面積 } S) \times (\text{平均風速 } V_{avg}) \quad (6)$$

(注) 本実験では, 乾燥中における籾層の重量変化は, 水分含量の変化から起こると仮定している.

3. 結果の整理と考察

- (1) 各層の乾燥特性曲線を求めよ.

乾燥時間と自由含水率(または, 含水率)の関係

- (2) 実際の変化を乾燥方程式(次式)の解と比較し, その差の原因を考察する.

$$\frac{dM_{di}(t)}{dt} = k(M_{di}(t) - M_{ei}), \quad i = 1 \sim 3 \quad \text{式(2)参照}$$

(注)平衡含水率 M_e は, 式(4)で算出する.

- (3) この条件で乾燥を続け, 14%wb にするには何時間必要か考察しなさい.