

## 混合穀物の水分移動シミュレーション

村田 敏\*・田川彰男\*・河野俊夫\*・石橋真人\*

### 要 旨

C. E. や R. C. で過剰荷受けのある際に、乾燥した穀物に混合する方法がとられることがある。したがって、混合した穀物間の水分移動を予測することは実際的な見地からも重要である。ここでは乾燥理論と同様に拡散方程式モデルを用いて解析した。しかし、第二種境界条件を用いた点と、密閉等温系では混合物の平衡含水率が一定であることやヒステリシスの温度依存性の実験式を用いた点に特徴がある。実験は粳、小麦およびビール麦について、2種の水分と5種の温度を組合せて行われたが、計算結果と極めてよい一致を見た。

## Simulation of Moisture Transfer among Cereal Grains

Satoshi MURATA\*, Akio TAGAWA\*,

Toshio KAWANO\*, Sadato ISHIBASHI\*

### Abstract

It is important to predict the rate of moisture transfer among the cereal grain from the standpoint of practical use because the grains are sometimes mixed with the dried stored grains at commercial grain drying facilities called Rice Center and Country Elevator in the case of the excess in the capacity.

A simulation model, as well as drying, was based on diffusion. However, the model is characterized with the existence of constant equilibrium moisture content between wet and dry grains, the second kind boundary condition, and the existence of the hysteresis in absorption and desorption of moisture.

The calculated moisture reductions and increases are agreed very well with the experimental results which we observed for five temperatures and a combination of initial moisture contents.

[Keyword] storage, cereals, hysteresis moisture transfer

### I はじめに

現在大型共同乾燥調製施設の過剰荷受けに対処するため荷受けした生籾ないし生麦を乾燥ずみの穀物に混合する緊急措置が提唱されている<sup>1)</sup>。こ

の基礎としての現実的な面と収穫した穀物の水分分布が平滑化していくことの定量的な説明や一般的に貯蔵中の水分移動の法則を明らかにするために実験と解析を行った。なお、水分の異なった二層間の水分移動については、既に著者らによって解析と実験が行われているので<sup>2)</sup>、ここでは混合した場合について報告する。

\* 九州大学農学部 (〒 812 福岡市東区箱崎 6-10-1  
☎ 092-641-1101) Fac. of Agr., Kyusyu Univ.  
Fukuoka, 812 Japan

## II 拡散モデル

水分の異なる同種の穀物を混合すれば高水分側は乾燥し、低水分側は吸湿して水分の平衡化が行なわれる。この現象は乾燥と同じく拡散理論によってシミュレーションを行なうことが出来ると考えられる。

ただし、乾燥と異なるのは、まず、強制通風が行なわれないために穀粒表面と接触大気との間の物質伝達係数が小さいために、その表面水分を大気の状態に対応する平衡水分に等しいと置けないことである。これは、乾燥と同じモデルを用いた計算結果が実測値より極めて早く平衡化することによって検証される。次にヒステリシスの為、高水分側と低水分側の平衡値に差の生ずることである。この二つが同じ拡散問題を扱っても乾燥と異なる点である。以下この点に留意してシミュレーションに必要な計算式を導いた。

### [基礎方程式]

混合する穀物の初期含水率(%, d. b.)を2種類とする。混合・密閉した穀粒群は2種類の含水率変化をたどるはずである。穀粒内の水分移動は拡散現象であることが知られているので<sup>3)</sup>、各々の群について次の基礎方程式が成立する。

$$\frac{\partial m_1}{\partial t} = D' \frac{\partial^2 m_1}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial m_2}{\partial t} = D' \frac{\partial^2 m_2}{\partial x^2} \quad (2)$$

ここに

$$D = D' / l^2 \quad (3)$$

### [初期条件]

はじめ、2種類の含水率であったことを式で示せば

$$m = m_{10}, m = m_{20}, t = 0 \quad (4)$$

### [境界条件]

穀粒内では板状モデルを考え、一端不透壁、他端が外気と水分交換をすると考える。なお、水分交換は乾燥と異なって外気の移動が極めて小さいため、第1種の境界条件は適用出来ないと考えられる。したがって一般的な物質移動の境界条件である第2種境界条件を用いた。また、その際に必要な平衡含水率はヒステリシスを考慮し、同外気に対し2種類を設定した。

$$\frac{\partial m_1}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial m_2}{\partial x} = 0, \quad x = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial m_1}{\partial x} = -\alpha(m_1 - m_{1e}), \quad x = 1 \quad (6)$$

$$\frac{\partial m_2}{\partial x} = -\alpha(m_2 - m_{2e}), \quad x = 1 \quad (7)$$

なお、全体が密封されている条件は、空隙の水分容量が極めて小さく、排出された水分は他方が吸収しなければならないので

$$W_1 \frac{\partial m_1}{\partial x} + W_2 \frac{\partial m_2}{\partial x} = 0, \quad x = 1 \quad (8)$$

式(6)と式(7)の両辺に  $W_1$  と  $W_2$  をそれぞれ乗じて相加え、

$$Y = W_1 m_1 + W_2 m_2 \quad (9)$$

とおけば、初期条件(4)と境界条件(5)と(8)から次式が得られる。

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = D' \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} \quad (10)$$

$$I. C. \quad Y = W_1 m_{10} + W_2 m_{20}, \quad t = 0 \quad (11)$$

$$B. C. 1 \quad \frac{\partial Y}{\partial x} = 0, \quad x = 0 \quad (12)$$

$$B. C. 2 \quad \frac{\partial Y}{\partial x} = 0, \quad x = 1 \quad (13)$$

この式は両端(0, 1)が不透壁で、初期に一樣な濃度を持つ拡散で、時間の経過に関せず全域に渡って濃度は不変である。すなわち

$$Y = W_1 m_{10} + W_2 m_{20} = \text{const.} \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (14)$$

式(6)と式(7)の両辺に  $W_1$  と  $W_2$  をそれぞれ乗じて相加え式(14)の結果を用いれば次式が得られる。

$$W_1 m_{1e} + W_2 m_{2e} = W_1 m_{10} + W_2 m_{20} = \text{const.} \quad (15)$$

$$m_e = \frac{W_1 m_{1e} + W_2 m_{2e}}{W_1 + W_2} = \frac{W_1 m_{10} + W_2 m_{20}}{W_1 + W_2} \quad (16)$$

したがって平均平衡含水率(d. b.)は時間に対して一定であることが証明され、その値は平均含水率に等しい。

勿論ヒステリシスがないならば、 $m_{1e} = m_{2e} = m_e$ 。だから、両平衡含水率は平均含水率に等しい。しかし、この場合ヒステリシスが存在するから、両平衡含水率と平均含水率(平均含水率に等しい)には差があり式(16)から次式が導かれる。

$$m_{1e} - m_e = \frac{W_2(m_{1e} - m_{2e})}{W_1 + W_2} \quad (17)$$

$$m_e - m_{2e} = \frac{W_1(m_{1e} - m_{2e})}{W_1 + W_2} \quad (18)$$

このヒステリシスによる平衡水分の差は、温度の関数であり、実験式が得られている。したがって、これを

$$\Delta m = m_{1e} - m_{2e} \quad (19)$$

とにおいて、次式が得られる。

$$m_{1e} = \frac{W_2 \cdot \Delta m}{W_1 + W_2} + m_e \quad (20)$$

$$m_{2e} = m_e - \frac{W_1 \cdot \Delta m}{W_1 + W_2} \quad (21)$$

これを元にして拡散方程式の解(板モデル)は

$$m_1 = (m_{10} - m_{1e}) \sum \frac{2\alpha^2 \exp(-\beta_n^2 D \theta)}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha)} + m_{1e} \quad (22)$$

$$m_2 = (m_{20} - m_{2e}) \sum \frac{2\alpha^2 \exp(-\beta_n^2 D \theta)}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + \alpha^2 + \alpha)} + m_{2e} \quad (23)$$

ここに

$$\beta_n : \beta \tan \beta = \alpha \text{ の } n \text{ 番目の根} \quad (24)$$

このDは実験式で求められている乾燥速度係数kより

$$D = 4k/\pi^2 \quad (25)$$

で求められる。

具体的な計算では乾燥速度係数に次式を利用しパラメーターは農業機械ハンドブックの値<sup>4)</sup>を利用した。

$$k = c \cdot \exp(-d/T_p) \quad (26)$$

### III 実験方法

1. 供試材料 本実験に供試した穀物は、粳、小麦、ビール麦の3種で、その品種、収穫年月日、収穫場所については、表1に示す。

表1 供試材料  
Table 1 Materials

穀物名	品 種	収 穫 日	収 穫 場 所
粳	レイホウ	1986年11月4日	福岡県粕屋郡須恵町
小 麦	チクソコムギ	1987年6月10日	福岡県朝倉郡夜須町
ビール麦	あまぎ二条	1987年5月31日	福岡県朝倉郡夜須町

2. 水分調整 収穫後、選別した各穀物は、高水分側、低水分側の材料として、それぞれ20% w. b. と13% w. b. を目標に調整した。

各穀物の含水率をあらかじめ10g粒-135℃-24時間法によって測定し、高水分側は、穀物400gに着色水(蒸留水にインクを少量加えた水)を

含水率が20% w. b. に算出した分量加えてビニール袋に密封し、24時間ごとに袋の外部より揉みほぐすことによって混合攪拌して吸湿させた。この結果、穀物表面は、薄い青色を呈するが、この後述の実験の際の高水分側、低水分側粒子を短時間に正確に分離するためのものである。また、低水分側は、穀物を通風のよい室内でビニール上に広げ、デジタル米麦水分計(Kett 科学 PB-10)により、その含水率の低下を確認しながら、約13% w. b. になるまで乾燥させた。このように吸湿および乾燥調整された穀物は更にビニール袋に密閉して約5℃の冷蔵庫内で6日間貯蔵し、水分の粒子内での平衡化を行なって測定に供した。

3. 実験手順 前節の方法によって高水分(約20% w. b.)と低水分(約13% w. b.)に調整した穀物から、それぞれ300gずつ取りだしてよく混合した後、10本のサンプル管瓶(40φ×107,100cc)に60gずつ封入した。これを、あらかじめ一定温度に設定した恒温槽に入れ、3, 6, 9, 12, 24, 36, 48, 72, 120, 168時間後に1本ずつ取りだして、ビニール板上で青色(初期含水率約20% w. b.)の穀物と他(初期含水率約13% w. b.)のものをすばやく仕分けし(約5分)、10g粒-135℃-24時間法でそれぞれの含水率を測定した、秤量は精密天秤(Simazu, RIBROR L-160DTP:感量0.1g)で行ない、恒温槽の温度制御はMini-7(CHINO Pt-100Ω)を用い、各穀物について10, 20, 30, 40, 50℃の5種類の温度に設定して測定した。低温設定は冷蔵庫を利用した。

着色による水分蒸散への影響については、各穀物100gを上記の方法によって14, 16, 18, 20% w. b. まで着色水で調整したものと、蒸留水で調整したものを同時に乾燥し重量変化を連続記録したが、有意差はなかった。

### IV 実験結果と考察

図1は粳、小麦、ビール麦について混合密閉後72時間経過した平衡した後の高・低両含水率の差(%d. b.)と温度の関係を示したものである。図でわかるように、これら3種類の穀物では種類に関係なく同じような傾向が見られ、温度が高くなるほどヒステリシスによる温度差が小さくなる。これは実際の乾燥や混合による水分調整にとって

重要であるばかりでなく、乾燥理論にとっても興味ある問題である。これは液（この場合水）の表面張力が表面の熱運動のために減少するためと考

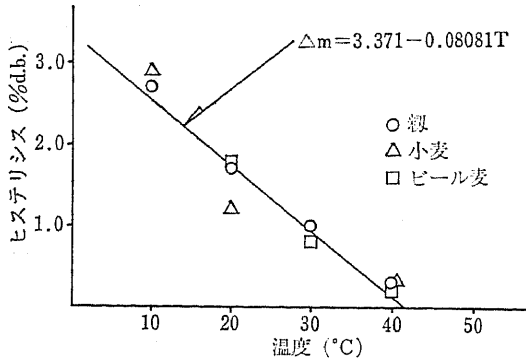


図1 温度のヒステリシスに与える影響  
Fig. 1 Temperature effect on hysteresis

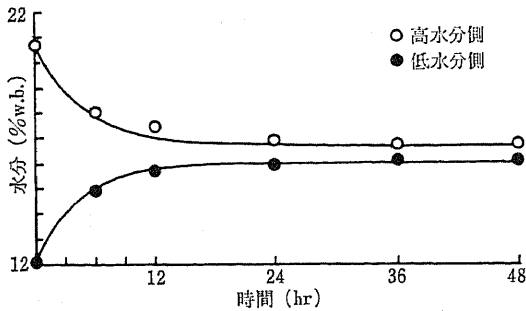


図2 混合穀物の水分移動 (粗粳30°C)  
Fig. 2 Moisture transfer between mixed low and high moisture grains(rough rice in 30°C)  
初期水分: 高水分側 20.7% (w. b.)  
: 低水分側 12.1% (w. b.)  
拡散指数:  $D=3.77412E-05$  (1/sec)  
無次元物質移動係数:  $\alpha=3.76196$  (—)

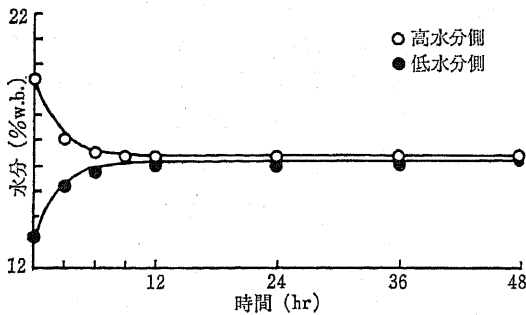


図3 混合穀物の水分移動 (粗粳50°C)  
Fig. 3 Moisture transfer between mixed low and high moisture grains(rough rice in 50°C)  
初期水分: 高水分側 19.4% (w. b.)  
: 低水分側 13.2% (w. b.)  
拡散指数:  $D=7.29502E-05$  (1/sec)  
無次元物質移動係数:  $\alpha=3.76196$  (—)

えてよいであろう。実験式としては次式が得られた。

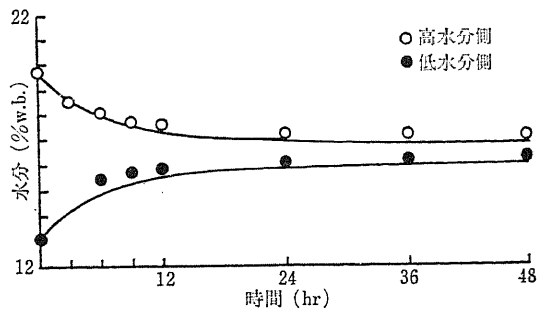


図4 混合物の水分移動 (小麦20°C)  
Fig. 4 Moisture transfer between mixed low and high moisture grains(wheat in 20°C)  
初期水分: 高水分側 19.7% (w. b.)  
: 低水分側 13.1% (w. b.)  
拡散指数:  $D=1.51575E-05$  (1/sec)  
無次元物質移動係数:  $\alpha=3.76196$  (—)

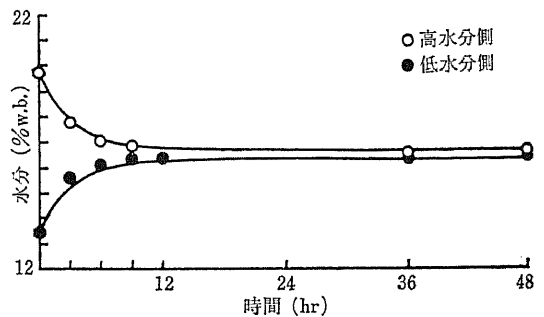


図5 混合穀物の水分移動 (小麦40°C)  
Fig. 5 Moisture transfer between mixed low and high moisture grains(wheat in 40°C)  
初期水分: 高水分側 20.2% (w. b.)  
: 低水分側 12.2% (w. b.)  
拡散指数:  $D=5.79050E-05$  (1/sec)  
無次元物質移動係数:  $\alpha=3.76196$  (—)

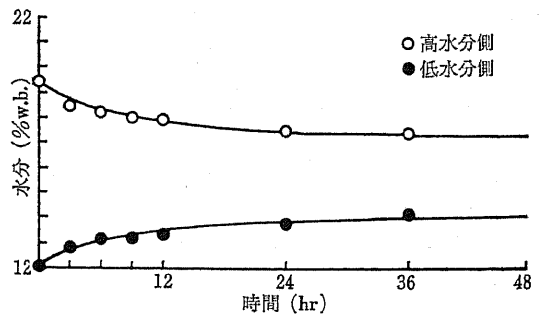


図6 混合穀物の水分移動 (ビール麦10°C)  
Fig. 6 Moisture transfer between mixed low and high moisture grains(barley in 10°C)  
初期水分: 高水分側 19.4% (w. b.)  
: 低水分側 12.0% (w. b.)  
拡散指数:  $D=9.18603E-06$  (1/sec)  
無次元物質移動係数:  $\alpha=3.76196$  (—)

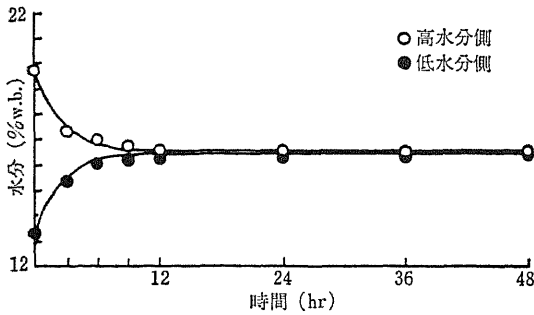


図7 混合穀物の水分移動(ビール麦50°C)  
 Fig. 7 Moisture transfer between mixed low and high moisture grains(barley in 50°C)  
 初期水分:高水分側 19.7% (w. b.)  
 :低水分側 13.3% (w. b.)  
 拡散指数:  $D=6.35959E-05$  (1/sec)  
 無次元物質移動係数:  $\alpha=3.76196$  (—)

$$\Delta m = 3.371 - 0.08081(T_p - 273.15) \quad (30)$$

図2, 図3は靐, 図4, 図5は小麦, 図6, 図7はビール麦について, 時間に対する含水率の変動を示したものである。いずれも温度が高くなるほど, 急速に高水分側と低水分側の含水率は近づく。また温度が高くなるほどヒステリメスによる平衡含水率の差も小さくなる。図中○印は測定値, 実線はパーソナルコンピュータ (Olivetti, S-2250)でシミュレーションして自動作図したものであるが, 両者はきわめてよく一致している。測定値の変動は各時間ごとのサンプルが異なった

個体であったことに由来するものと思われる。貯蔵中の穀物の水分移動は乾燥同様拡散理論によって精密に予測できることがわかった。

記号

- D: 式(3)で定義される拡散指数 (1/sec)
- D': 拡散係数 ( $m^2/sec$ )
- k: 乾燥速度係数 (1/sec)
- l: 穀物粒子の代表長さ (m)
- m: 含水率 (%d. b.)
- x: 穀物中の無次元化された代表長さ (—)
- $\alpha$ : 熱伝導の Biot 数に相当する無次元物質移動係数 (—)

サブイックス

- 1, 2: 穀物を区別する数字
- e: 平衡
- 0: 初期

引用文献

- 1) 村田 敏, 田川彰男, 石橋真人: 貯蔵中穀物層の水分移動, 農機誌 50(2), 1988
- 2) 山下律也: 穀物乾燥施設の診断, (1985), 農業機械学会, 東京
- 3) 村田 敏: 穀物の特性と乾燥速度の予測, 農機誌 44 (3), 517-523, 1982
- 4) 農業機械学会編新版農業機械ハンドブック (1984), コロナ社, 東京

(原稿受付昭和63年2月16日・質問期限平成元年9月30日)

コメント

【読者のコメント】

水分の異なる穀物を混合した際の水分の挙動については多くの研究があるが, 理論的に解析したものは少ない。ここで求められた式が, 実際規模の貯蔵中のものに適応した研究に発展することを期待したい。

【コメントに対する著者の見解】

この研究はいわゆる孤立・等温系で行った実験を対象としていますから, 一般貯留庫のように, すきまがあり, 断熱も十分でない場合には, そのまま適用するわけには参りません。貯蔵量が大きい場合には, 空気の動きも鈍く, 温度変化も小さいと考えられますので, ほぼ同じ変化が起こっていると考えてよいと思います。また, この研究で実証されたシミュレーションは任意の初期含水率の組合せと温度に対し直ちに行なうことができま

すので, 温度の変動する場合にもそれらを組合せて推定することが可能です。近く実験上の見地から, 種々の初期含水率と温度および穀物の組合せのシミュレーション結果の図を資料として提供したく思っております。いずれにしても, この研究で平衡含水率の温度依存性が定量的にはっきりし, 拡散方程式で精密に水分移動が説明出来ることになりましたので, 例えば有限要素法または選点法を拡散方程式に適用したプログラムを変更すれば, 任意の温度変動に対応するシミュレーションも可能ですし, 実験は厄介ですが, 混合し積極的に通風した場合のシミュレーションも可能になりました。これから, 種々の実際条件を設定し, より実用的で確実なシミュレーションを行ないたいと考えております。