

玄米の乾燥における輸送現象 (1) — 実験的研究 —

山口 信吉, 若林嘉一郎

緒 言

乾燥過程および乾燥後の貯蔵過程における玄米の内部応力を求めて乾燥割れ機構を追求するに当り、同過程における輸送現象（熱と物質の移動現象）の解明が求められる。すなわち、熱応力解析のために温度分布の変化が必要であり、水分差応力（粒内の不均一な含水率分布に起因する応力）解析のために含水率分布の変化が必要である。

本報(1)では、玄米の薄い層の乾燥（層の厚さの影響が無視できるほどの薄い層）に関する基礎実験の結果によって、物質（水分）移動機構を基本的に検討する。この結果に基づいて(2)では、熱と物質の移動現象を解析的に検討する。

1. 実験方法

1. 1 実験試料

収穫後のもみ（品種：ホーネンワセ）を乾燥することなく高い含水率の状態（含水率 $w=0.33\text{kg}/\text{kg}(\text{d. s.})$ 程度）で低温貯蔵（ $0\sim 5^\circ\text{C}$ ）した。そのもみのもみがらを指でていねいに除去し、割れない整粒を選んで玄米試料とした。もみがら除去作業では、玄米に傷をつけないようにとくに注意した。玄米試料は所要の含水率に調整したのち、実験に使用するまで再び低温貯蔵した。

1. 2 実験装置および方法

乾燥実験装置の概要を図1に示す。

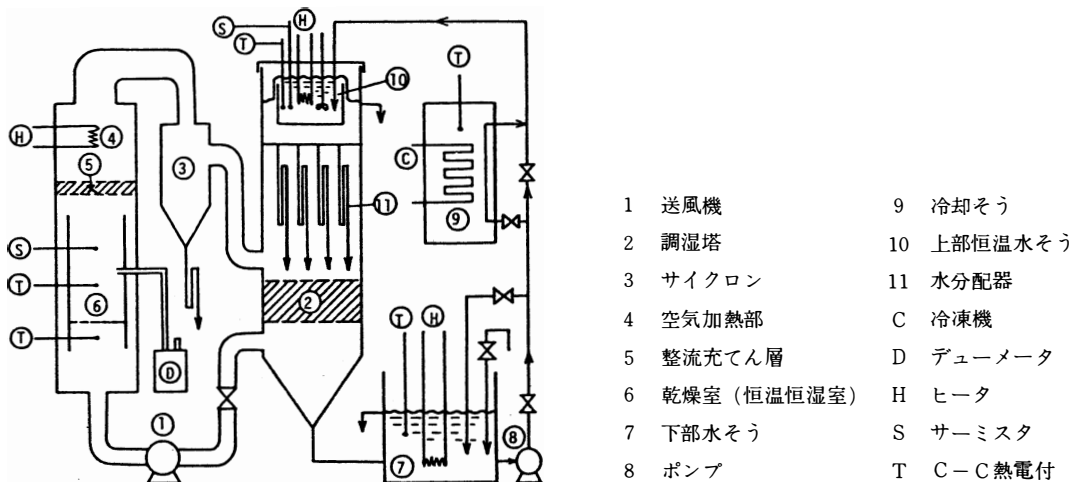


図1 乾燥実験装置の概要

送風機①で圧送された空気は、調湿塔②で一定条件の水と向流に接触し、サイクロン③で同伴水滴と分離されて空気加熱部④に入る。そこで一定温度に加熱された空気は整流充てん層⑤を通過し、恒温恒湿の乾燥室⑥に導かれたのち、再び送風機に戻される。調湿塔②で空気と接触した水は水槽⑦に貯えられたのち、ポンプ⑧を経て調湿塔頂部の恒温水槽⑩に送られる。水の冷却が必要な場合は冷却槽⑨内に配管された管路が開かれる。

恒温恒湿の乾燥室⑥付近は2重ダクトで構成されており、内側ダクト（乾燥室）の断面は20×20cmの正方形をなし、外側ダクトとの間に5cmの間隙がある。ダクトの一面に2重の戸口が設けられており、そこから玄米試料を乾燥室に入れて乾燥し、乾燥中の試料重量を測定する場合、同じ戸口から試料を取り出してすみやかに料量した。乾燥中は2重の戸口は密閉された。

装置には全体的に3～5mmの厚さの断熱材（牛毛フェルトまたはガラス繊維）を巻き付け、乾燥室付近の断熱はとくに嚴重にした。長時間（4日間程度以上）の実験中に外気温の変動が乾燥室の空気条件に少なからず影響を与えるので、エアコンを導入して実験装置を設置してある実験室内の温度を調整した。

2. 実験結果

2.1 乾燥実験中における試料重量測定法に関する実験結果

実験装置の乾燥室を流れる空気の条件を温度 $T_f = 35^\circ\text{C}$ 、関係湿度 $\varphi = 34\%$ 、流速 $u_f = 1.5\text{m/s}$ に設定した。初期含水率 w_i を 0.25kg/kg(d.s.) に調整した約200粒の玄米試料を金網製の箱（底面 40×40 、深さ10mm）に並べ、それを乾燥室に入れて乾燥を開始した。適当時間間隔（0.5, 1.0, 1.5時間など）ごとに試料をとり出してすみやかにその重量を測定し、測定後直ちに乾燥室に戻した。この操作を試料の重量変化が認められなくなるまで（40時間程度以上）繰り返したのち、試料を $135 \pm 3^\circ\text{C}$ に設定してある別の電気定温乾燥器内で24時間乾燥して絶対重量を決定した。その絶対重量に基づいて乾燥基準の含水量 w [kg/kg(d.s.)] を求めた。この実験をA実験と呼ぶことにし、その結果を図2に○印で示した。

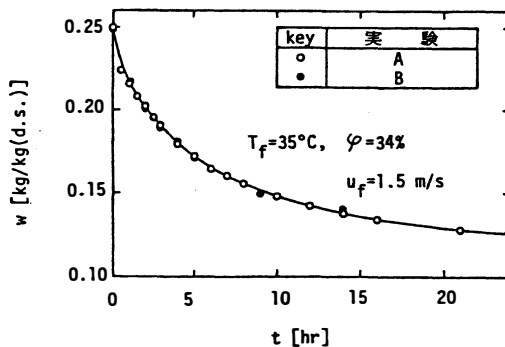


図2 試料重量測定法と含水率変化曲線

A実験における重量測定には25～40秒の時間を要し、測定室の室温は10～17℃、絶対湿度は $0.008 \sim 0.011\text{kg/kg(d.s.)}$ 程度であった。このA実験では、秤量のために試料を乾燥室からとり出すことによって、連続して乾燥する場合にくらべて測定値に誤差を生じる恐れがある。その影響を調べるため、次に述べるB実験を行い、両実験で得られた含水率変化を比較することにした。

A実験と同条件の数個の玄米試料を同条件の乾燥室に入れて乾燥し、試料ごとにあらかじめ決められた時間（1, 2, …, 24時間）だけ連続して乾燥（途中でとり出すことなく）した。その時間の乾燥終

了後の試料重量を測定し、電気定温乾燥器（135±3℃）に入れて絶乾重量を測定した。この実験をB実験と呼び、その結果を図2に●印で示した。

図2においてA実験（○印）とB実験（●印）の結果はほぼ一致しており、A実験の誤差は無視してよいことがわかる。これより、以後の含水率変化測定実験では、操作の容易なA実験の手法を採用することにした。

2. 2 薄い層の乾燥に関する検討結果

薄い層の乾燥とは、堆積粒子全体が送入空気とほとんど変わらない温度と湿度の空気にふれている状態における通気乾燥のことである。この状態は一般に粒子層が薄いとされ易いが、必ずしも寸法的に薄いということではなく、粒子量の割合に比べて空気量が多く、空気速度が乾燥特性に影響を与えない場合のことである。本報では、玄米の乾燥における輸送現象を基礎的に追求するため、薄い層の乾燥実験を行うこととし、まず、上述の条件の成立を確かめた。

乾燥空気の条件を $T_f = 35 \sim 36^\circ\text{C}$ 、 $\varphi = 34 \sim 35\%$ 、 $u_f = 0.5\text{m/s}$ に設定し、玄米の初期含水率 w_1 を 0.24kg/kg(d.s.) に調整した。玄米試料の1つ（約200粒、4.5g）を全網製の箱に単粒子層（粒が相互に重ならない状態）に並べ、他の1つ（約600粒、14g）を3粒子層に並べて乾燥し、両試料の含水率変化を測定した。

実験の結果を図3に示す。図中の○印および●印のプロットはそれぞれ単粒子層および3粒子層の

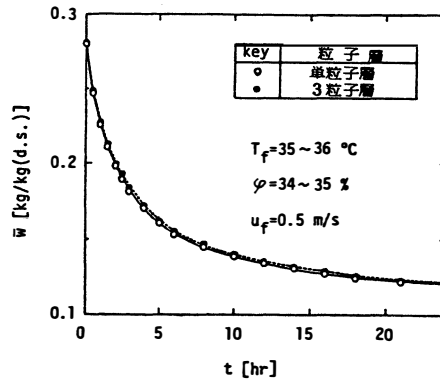


図3 単粒子層と3粒子層における乾燥曲線

漸定値を表すものであり、両値はほぼ一致している。すなわち、両層とも薄い層の条件を満たしているといえる。この結果より、本研究では空気流速を 0.5m/s 以上にとり、3粒子層以下の深さの層を用いて実験を行うことにした。

2. 3 含水率変化に及ぼす空気流速の影響に関する検討結果

乾燥空気の温度（ $T_f = 35 \sim 36^\circ\text{C}$ ）と湿度（ $\varphi = 32 \sim 35\%$ ）を一定とし、空気流速を変えた場合（ $u_f = 0.5, 1.1, 1.9, 2.7\text{m/s}$ ）の含水率変化を測定した。同一条件の玄米粒子群（ $w_1 = 0.32 \sim 0.33\text{kg/kg(d.s.)}$ ）を無作為に200粒ずつに分け、各試料を単粒子層に並べて乾燥した。

長時間（40時間程度）乾燥を続けると含水率変化は認められなくなり、その値を平衡含水率 w_e とみなすことにした。これより、無次元含水率 $\bar{W} = (\bar{w} - w_e) / (w_1 - w_e)$ を算出し、それと乾燥時間 t との関係を図4に示した。ここに、 \bar{w} は粒内平均含水率（実測される含水率）である。

図4によると、 $0.5 \sim 2.7\text{m/s}$ の範囲で4段階に変えられた空気速度の条件におけるプロットがほぼ1本の曲線で表され、この範囲では空気速度の変化が玄米の乾燥特性に影響を与えないと認められ

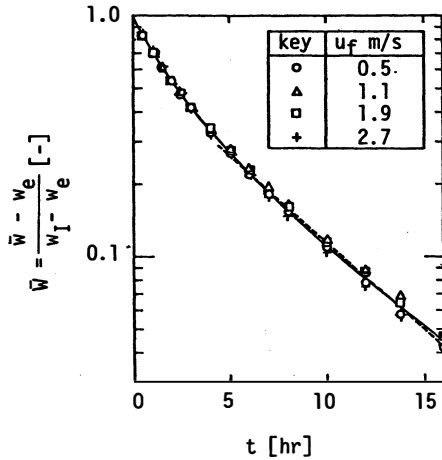


図4 空気流速の異なる条件での乾燥曲線

る。これは小麦層に関するHenderson ら¹⁾の実験結果と一致する。この結果は、玄米や小麦粒の乾燥における物質（水分）移動の支配的抵抗は粒子内部にあり、空気側の抵抗は無視小であることを示すものである。すなわち、乾燥条件一定の場合、玄米粒表面の含水率は平衡含水率 w_e に保たれると考えるとよいことになる。

3. 玄米粒内水分の有効拡散係数

3.1 有効拡散係数の定義

図4において、乾燥開始後ある程度時間が経過すると（図の場合6時間程度）、減量曲線は直線的になっている。これは、粒内水分が含水率 w の勾配に比例して拡散則に従って移動すると考えてよいことを示唆するものである。すなわち、 r 座標方向への水分流束 N_w [kg/m²h] は次のように表される。

$$N_w = -(D/\nu) (\partial w / \partial r) \tag{1}$$

ν は玄米の比容積 [m³/kg(d. s.)] であり、ここでは乾燥収縮を無視してそれを定数とみなすこととし、著者らの測定値³⁾ ($\nu = 0.672 \times 10^{-3}$ m³/kg(d. s.)) を用いる。Dは有効拡散係数 [m²/h] であり、上式はその定義式でもある。

3.2 有効拡散係数推定法（だ円体に関する伝熱問題の近似解の応用）

玄米のような不定形状の物体に関する非定常伝熱問題を取り扱うに当たり、Smith ら²⁾はその物体の形状を次のようにしてだ円体に近似することを提案している。物体の中心を通り、中心から物体の表面までの最短距離をその物体の代表径 l とする。物体内にその l を含んで直交する2断面を想定し、最大断面の面積を S_A 、最小断面の面積を S_B とおく。2 l を短径とし、 S_A と等しい面積をもつだ円の長径を2 l_A 、 S_B と等しい面積をもつだ円の長径を2 l_B と表す。次に、 $l_A/l = S_A/\pi l^2 = A$ 、 $l_B/l = S_B/\pi l^2 = B$ において、次式によって形状指数 G [-] が定義された。

$$G = \frac{1}{4} + \frac{3}{8A^2} + \frac{3}{8B^2} \tag{2}$$

最初、内部温度が一様に T_i であるだ円体を一定温度 (T_f) の流体中に入れ、表面から均等に熱が移動するという非定常伝熱問題に関しては、その解析解は見出されていない。Smithらは、特殊な形状の物体（無限平板、無限円柱、球）の場合における同様な非定常伝熱問題の解析解の特徴を調べ、その結果を応用してだ円体に関する近似解法を示している。その近似解は、比較的長時間経過後に次のように表されるというものである。

$$\frac{T - T_f}{T_i - T_f} = C_1 \exp(-M_1^2 F_0) \quad (3)$$

上式の C_1 は物体の形状に関する定数であり、 M_1^2 はビオ数 B_i と形状指数 G の関数 ($M_1^2 = f(B_i, G)$) である。その関数関係をSmithらはノモグラフで与えているが、だ円体内部の伝熱抵抗に比べて流体側のそれが無視小である場合、次のようになる。

$$M_1^2 = G\pi^2 \quad (4)$$

本研究では、上述のSmithらの伝熱問題の解法を乾燥問題に応用し、空気側物質移動抵抗を無視小とにおいて（すると $M_1^2 = G\pi^2$ となる）、比較的長時間後における玄米粒の平均含水率 \bar{w} を次式で表すことにした。

$$\bar{W} = \frac{\bar{w} - w_e}{w_i - w_e} = C_1 \exp\left(-G\pi^2 \frac{Dt}{\ell^2}\right) \quad (5)$$

図4のように $\ln \bar{W}$ 対 t の関係をプロットすれば、次のようにして有効拡散係数 D が求められる。 t の比較的大きい範囲（それは \bar{W} の小さい範囲であり、その範囲は球に関する解析結果より $\bar{W} < 0.3$ 程であることがわかる）におけるプロットを代表する直線を引き、その勾配 K を求める。粒子の寸法を測定して ℓ と G を求めれば、式(5)より得られる次式で D を算出することができる。

$$D = -K\ell^2 / G\pi^2 \quad (6)$$

3. 3 有効拡散係数と相当半径の決定

式(6)によって玄米の有効拡散係数を求めるに当り、玄米粒の長さ、幅および厚さをそれぞれ ℓ_A 、 ℓ_B および ℓ とみなすことにし、それらを測定することにした。含水率を0.31、0.22および0.18kg/kg(d.s.)に調整した玄米整粒を各30粒（合計90粒）選び出し、各粒の ℓ_A 、 ℓ_B および ℓ をデジタルゲージ（SONY-G50：読みとり精度0.02mm）で測定した。各含水率の玄米30粒についての測定値の平均値を求め、それを表1に示した。3水準の含水率における値（30粒平均値）をさらに平均した値を

表1 玄米粒（ホーネンワセ）の寸法および形状指数

moisture content [kg/kg(d.s.)]	diameters [mm]			diameter ratios [-]		geometry index [-]
	$2\ell_A$	$2\ell_B$	2ℓ	A	B	G
0.31	5.18	2.95	2.05	2.53	1.44	0.490
0.22	5.08	2.88	2.01	2.53	1.43	0.492
0.18	5.03	2.80	1.99	2.53	1.41	0.498
(average)	5.10	2.88	2.02	2.52	1.43	0.492

代表値として用いることにし、表の下欄に示した。これより、 $\ell = 1.01\text{mm}$, $G = 0.492$ とみなすことにした。

一方、図4において $t > 6\text{h}$ のプロットを直線で結び (図の破線), その勾配 $K = -0.166\text{h}^{-1}$ が得られた。これらを式(6)に入れると、 $D = 3.5 \times 10^{-8}\text{m}^2/\text{h}$ と求められる。

玄米を半径 b なる球とみなすと、球の形状指数 G は明らかに 1.0 であるから、式(6)の右辺は Kb^2/π^2 と表される。これと式(6)の右辺が等しい (すなわち、左辺 D が等しい) とおくと、玄米の球相当半径 b は次式で与えられる。

$$b = \ell / \sqrt{G} \quad (7)$$

上式と、表1の値より、 $b = 1.44 \times 10^{-3}\text{m}$ が得られる。

結 言

玄米の乾燥における輸送現象を追求するため、基礎的実験を行った。まず、玄米の減量測定法および薄い層の乾燥に関する実験法の合理性を確認し、乾燥特性に及ぼす空気流速の影響を調べた。また、玄米粒子の寸法測定を行った。

実験結果に基づいて薄い層の乾燥過程における玄米粒内の水分移動現象を追求し、次に示す結果を得た。

(1) 玄米粒内の物質移動抵抗に比べて空気側の抵抗は無視小であり、乾燥中の粒表面は平衡含水率に保たれる。

(2) 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してよい。

(3) 乾燥による含水率変化曲線より、粒内水分移動の有効拡散係数の近似的推定法を示し、その場合の玄米の球相当半径の求め方を示した。

(4) その推定法により、有効拡散係数 $D = 3.5 \times 10^{-8}\text{m}^2/\text{h}$, 相当半径 $b = 1.44 \times 10^{-3}\text{m}$ が得られた。

使用記号

A, B	: だ円体の主軸径比, $A = \ell_A / \ell$, $B = \ell_B / \ell$	[—]
B_1	: ビオ数	[—]
b	: 相当半径	[m]
C_1	: 式(3), (5)の定数	[—]
D	: 有効拡散係数	[m ² /h]
F_0	: フーリエ数	[—]
G	: だ円体の形状指数	[—]
K	: $\ell_n \bar{W}$ 対 t のプロットの直線部分の勾配	[h ⁻¹]
ℓ	: だ円体の短主軸の半長 = だ円体の代表半径	[m]
ℓ_A, ℓ_B	: だ円体の長, 中軸の半長	[m]
M_1	: 式(4)で与えられる	[—]
N_w	: 物質移動流束	[kg/m ² h]
r	: 半径座標	[m]
T_f	: 乾燥空気の温度	[°C]
t	: 時間	[h]

u_f	：空気流速	[m/s]
v	：玄米の比容積	[m ³ /kg(d.s.)]
\bar{w}	：無次元含水率	[-]
w, \bar{w}	：含水率	[kg/kg(d.s.)]
w_e, w_i	：平衡含水率, 初期含水率	[kg/kg(d.s.)]
ϕ	：乾燥空気の関係湿度	[%]

参考文献

- 1) Henderson, S.M., S.Pabis : J. Agric. Engng Res., 7, 85 (1962)
- 2) Smith, R.E., G.L. Nelson, R.L. Henrickson : Trans. ASAE, 10, 236 (1967)
- 3) 山口信吉, 若林嘉一郎, 細野八郎 : 農業機械学会誌, 39, 179 (1977)

Transport Phenomena for Drying of Brown Rice Kernel (1) — Experimental Study —

Shinkichi YAMAGUCHI and Kaichiro WAKABAYASHI

Summary

In order to investigate the transport phenomena for drying of brown rice kernel, some fundamental experiments were carried out. The results obtained were summarized as follows:

(1) It could be considered that the mass transfer resistance in air flow was negligibly small as compared with that in the rice kernel, so that the moisture content on the surface of the kernel reached an equilibrium value with the drying condition.

(2) It could be assumed that the mechanism of moisture movement was given by a diffusion model based on the gradient of the moisture content in the kernel.

(3) It was shown that the effective diffusivity of the moisture in the kernel could be estimated by observing the drying curve and measuring the dimensions (length, width and thickness) of the kernel, and that an equivalent radius of the kernel could be also determined by the above experimental results.

〔英文和訳〕

玄米の乾燥における輸送現象 (1)

— 実験的研究 —

山口 信吉, 若林嘉一郎

要 約

玄米の乾燥における輸送現象を追究するため基礎的実験を行い、次の結果を得た。

(1) 空気流の物質移動抵抗は米粒内部の抵抗に比べて無視小であり、したがって粒表面の含水率は乾燥条件における平衡値になると考えることができる。

(2) 水分移動機構は粒内の含水率勾配に基づく拡散モデルで表現されるとみなせる。

(3) 乾燥曲線と粒の寸法 (長さ, 幅および厚さ) より粒の有効拡散係数が求まり、またそれらの測定値より粒の相当半径が決定されることを示した。

(1985年10月31日受理)