



Title	小麦の厚層乾燥に関する基礎的研究
Author(s)	伊藤, 和彦; ITOH, Kazuhiko; 川村, 周三 他
Citation	北海道大学農学部邦文紀要, 17(3), 221-227
Issue Date	1991-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/12128
Type	departmental bulletin paper
File Information	17(3)_p221-227.pdf



小麦の厚層乾燥に関する基礎的研究

伊藤和彦・川村周三・樋元淳一・李里特*

(北海道大学農学部農畜産加工機械学講座)

(*現 中国北京農業工程大学食品工程系)

(平成2年8月20日受理)

Studies on Deep-bed Drying of Wheat

Kazuhiko ITOH, Shuso KAWAMURA, Jun-ichi HIMOTO and Li Te Li

(Laboratory of Agricultural Process Engineering, Faculty of Agriculture,
Hokkaido University, Sapporo, Japan)

(*Faculty of Food Engineering, Peking Agricultural
Engineering College, Peking, China)

I. はじめに

小麦の乾燥に関する基礎的研究は従来より国内および国外、特に国外において数多く行われてきた。研究の多くは薄層状態の試料を対象としており、供給される空気の温湿度は試料層内部の全ての場所で常に一定であると見なし乾燥特性式の提示などが行われている^{1,2,5,6)}。

最近、北海道における収穫時の小麦水分が急速に高くなりつつある。この原因は収穫時の小麦が低温と降雨に遭遇した場合に生ずる品質低下、すなわちアミロ値の低下を防止するために早刈りの傾向が一段と進んだことにある。水分40%にも達する高水分小麦が収穫されると乾燥開始時の水分を28~30%程度に想定して設計されている従来方式の乾燥機でこれを処理することが困難になり、乾燥調製施設の処理能力が低下している。

乾燥調製施設の処理能力を高める方策の一つとして「ドライストア」を施設に付設し、これによって高水分小麦の予備乾燥を行い、既設の乾燥機によって仕上げ乾燥を行う方式が採用されている。

ドライストアとは角形または円筒形鉄板製ピンと通風装置および搬送装置を組み合わせた施設の名称である。この施設は高水分米麦の予備乾燥施設として、また予備乾燥後の中間水分(18~20%)材料の一時貯留施設として、さらに乾燥終了後の長期貯蔵庫としても利用することが可能である^{3,4)}。

ドライストアを使用して高水分小麦を乾燥する場合、乾燥施設の能力を向上させるために通常50~150 cmの厚さに材料を堆積して通風を行っている。この場合の乾燥特性は従来の薄層を対象とした乾燥理論では説明できず、薄層乾燥理論式を厚層に拡大利用しても理論値と実測値との間には無視できない程度の差が生じる。かかる現況を考慮して、本研究では実用施設に直接応用できる資料を得ることを目的として実験を行った。まず厚層乾燥実験装置を試作し、これを用いて試料水分、通風温度、通風量および層厚さと平均乾燥速度ならびに層内水分差などとの関係を明らかにした。

II. 実験方法

A. 実験装置

Fig. 1に試作した実験装置の概略を示した。装置は送風機、通風量調節・測定装置、通風温度調節・測定装置および試料充填槽からなっている。送風機は5.4 m³/min(静圧500 mmAqにて)の性能を示す遠心高圧ファンを用いた。通風量の調節はベルト式無段変速機を用いて行った。通風空気の温度調節はヒーター(1,500 Wおよび500 Wのニクロム線ヒーター)への供給電源電圧の調節と温度調節器を用いた電源のon-off制御を組み合わせて行った。

試料充填槽は内寸法150×150×100 mm(2,250 cm³)の角形鉄板製容器を用い、層厚さに対応させて容器を積み上げたものとした。なお、試料容器の

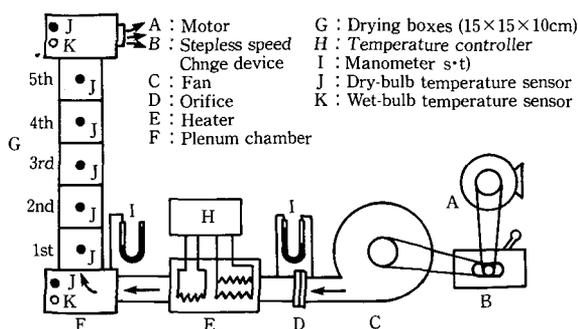


Fig. 1. Experimental equipment for deep-bed drying.

内側に厚さ 10 mm の発泡スチロール板を取り付けて断熱処理を行ったので試料容器の実容積は 1,690 cm^3 となった。試料容器の底部は有孔鉄板（孔径 1.7 mm）となっており開孔率は 32.4% である。この開孔率は実用のドライストアビンに使用されている方向性を持った有孔鉄板の開孔率に比較して約 10% 大きな値になっている。実験に際して試料容器 1 個に試料約 1 kg を精秤し、これを充填した。

B. 測定項目と測定方法

1. 通風量

送風機出口側の直管部に設置したオリフィス板によって取り出した静圧差を傾斜マンメータによって計測し、温度補正を行って通風量を求めた。通風量は小麦 1 トン、毎秒当り、20°C における風量に換算して表した。

2. 温度

通風空気の乾湿球温度は試料充填槽下部の与圧室で、排気空気の乾湿球温度は試料充填槽上部でそれぞれ測定した。乾燥過程の試料温度は各試料容器中心部において測定した。センサーは銅・コンスタンタン熱電対を用い、測定値はデータローガに収録しマイコンによって処理した。

3. 試料水分

初期水分は農業機械学会で用いている基準全乾法（135°C, 10 g, 粒, 24 hr 法）によって求めた。乾燥中の試料水分は初期水分値と試料重量とから求めた。試料重量は乾燥程度に対応させて適宜電子天秤で測定した。

4. 試料層の圧力損失

試料充填槽下部と与圧室の静圧と大気圧との差圧をマンメータで測定し、これを試料層の圧力損失とし、水柱高さ (mmAq) で表した。

C. 実験条件

Table 1 に実験条件を一括して示した。実験番号 1~18 は試料層厚さを 50 cm（試料容器 5 段積み）とし、通風温度を 25, 30, 35°C, 通風量を 0.5, 0.8, 1.0 $\text{m}^3/\text{sec}\cdot\text{t}$, 試料初期水分を 25, 30% とした実験区である。実験番号 19~27 は通風量を 0.5 $\text{m}^3/\text{sec}\cdot\text{t}$ とし、主に試料層厚さを変化させた実験区である。

D. 供試材料

試供小麦は 1983 年 8 月 7 日に空知管内由仁町で収穫した「ホロシリ」である。収穫は小麦用自脱形コンバインを用いて行った。試料中の完全粒の比率は 98% を示し、高品質な試料であった。収穫した試料は当日研究室に搬入し、約 7 kg ずつポリエチレン袋に詰め、3~5°C の冷蔵庫に貯蔵しつつ実験に供した。収穫時の試料水分がほぼ 30% であったので、一部を室内で自然乾燥し水分 25% の試料を調整して実験に供した。なお、実験開始はほぼ 10 時間前に試料を冷蔵庫から取り出して試料温度を 22~25°C まで高めた後に実験を開始した。

III. 実験結果および考察

A. 乾燥条件と乾燥速度

Fig. 2 に通風温度 30°C, 通風量 0.5 $\text{m}^3/\text{sec}\cdot\text{t}$, 試料層厚さ 30 cm なる乾燥条件（実験番号 No. 23）で初期水分 25.1% の試料を乾燥した場合の各試料容器別（各層厚さ別）の平均水分、試料層全体の平均水分および最大水分差（上段容器の平均水分—下段容器の平均水分）の経時変化を示した。通風温度は $30 \pm 0.4^\circ\text{C}$, 実験期間を通しての通風空気の絶対湿度は 0.012~0.016 kg/kg であった。本図より、下段（底から 0~10 cm）の乾燥速度が最も早く、中段（底から 10~20 cm）および上段（底から 20~30 cm）がこれに続いた。試料全体の平均水分は中段の平均水分とほぼ同じ値を示した。試料全体の水分経過を見ると平均水分 18% まで、乾燥時間の経過に伴って直線的に減少しており、このことからこの間の乾燥状態を一次式で表示することが可能であることを知った。

試料層内の水分差は下段の水分が急激に低下することに伴って増加し、乾燥開始はほぼ 7 時間後に最大値 7% を示し、その後上段の水分が低下するのに伴って徐々に減少し、23 時間後には 3% となった。

Fig. 3 に通風温度 30°C, 通風量 0.5 $\text{m}^3/\text{sec}\cdot\text{t}$,

Table 1. Drying conditions.

Number	Air temp. (°C)	Airflow rate (m ³ /s·t)	Depth (cm)	Initial moist. cont. (% W. B.)
1	35	1.0	50	29.6
2	35	0.8	50	29.7
3	35	0.5	50	29.8
4	35	1.0	50	24.9
5	35	0.8	50	24.9
6	35	0.5	50	25.0
7	30	1.0	50	29.7
8	30	0.8	50	29.8
9	30	0.5	50	29.4
10	30	1.0	50	25.0
11	30	0.8	50	24.8
12	30	0.5	50	25.0
13	25	1.0	50	29.6
14	25	0.8	50	29.8
15	25	0.5	50	30.2
16	25	1.0	50	25.0
17	25	0.8	50	25.2
18	25	0.5	50	25.2
19	30	0.5	30	30.1
20	30	0.5	70	30.0
21	30	0.5	100	29.4
22	30	0.5	140	29.6
23	30	0.5	30	25.1
24	30	0.5	70	25.2
25	30	0.5	100	25.1
26	30	0.5	140	25.0
27	35	0.5	140	29.8

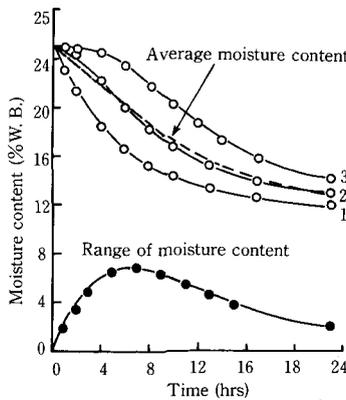


Fig. 2. Moisture content and range of moisture content in drying (Experiment No. 23). Drying conditions are: drying air temperature, 30°C, airflow rate, 0.5m³/s·t, bed depth, 30cm.

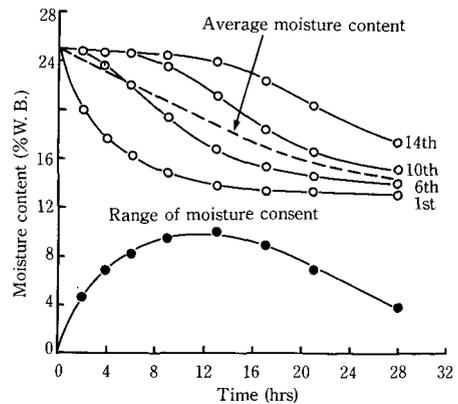


Fig. 3. Moisture content and range of moisture content in drying (Experiment No. 26). Drying conditions are: drying air temperature, 30°C, airflow rate, 0.5m³/s·t, bed depth, 140cm.

試料層厚さ 140 cm なる乾燥条件 (実験番号 No 26) の各層厚さ別水分および最大水分差の経時変化を示した。本図から平均水分は Fig. 2 と同様に乾燥時間の経過とともに平均水分 18% まで直線的に減少することを認めた。この関係は全ての実験区において認められた。すなわち、乾燥時間を T (hr) とし、平均水分を M (%) とすると

$$M = A - BT \dots\dots\dots ①$$

なる関係が成立する。ここで、A, B は定数である。Table 2 に A および B 値を示した。B 値は乾燥速度の大小を示す値となる。表より、通風温度が高く、通風量が多く、層厚さが薄いほど B 値が大きい値を示し、乾燥速度が大きくなることを確認した。この式を利用することによって平均水分 18% までの乾燥経過を予測することが可能になり、ドライストアにおいて高水分小麦を半乾状態に調製するときに利用することができる。

Table 2. A and B value in experimental equation ①.

Number	A	B
1	29.6	1.22
2	29.7	0.95
3	29.8	0.83
4	24.9	0.76
5	24.9	0.60
6	25.0	0.52
7	29.7	1.07
8	29.8	0.78
9	29.4	0.69
10	25.0	0.71
11	24.8	0.59
12	25.0	0.48
13	29.6	0.90
14	29.8	0.73
15	30.2	0.62
16	25.0	0.77
17	25.2	0.61
18	25.2	0.54
19	30.1	0.85
20	30.0	0.60
21	29.4	0.53
22	29.6	0.41
23	25.1	0.72
24	25.2	0.56
25	25.1	0.40
26	25.0	0.38
27	29.8	0.59

B. 乾燥過程の水分差

ここでは試料層内部の最大水分差、最大水分差が発現するまでの時間および最大水分差が生じたときの最下段層水分について考察する。

1. 乾燥条件と水分差

Fig. 4 に初期水分 25% 前後、通風温度 30°C, 層厚さ 50 cm の場合の通風量別水分差の経時変化を示した。本図から通風量の増加に伴って水分差は減少し、最大水分差が生じるまでの時間は短縮されることが判明した。

Fig. 5 に初期水分 30% 前後、通風量 0.5 m³/sec·t, 層厚さ 50 cm の場合の通風温度別水分差の経時変化を示した。水分差は通風温度の上昇に伴って増加し、さらに最大水分差が生ずるまでの時間が延長された。Fig. 4 に示した初期水分 25% 前後の場合

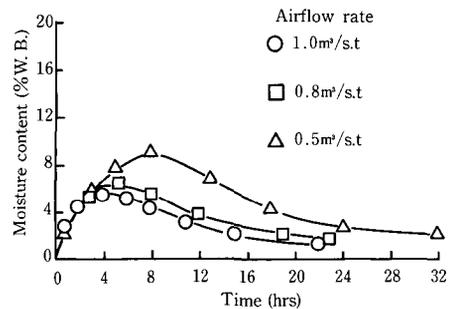


Fig. 4. Range of moisture content in drying (Experiment No. 10, 11, 12). Drying conditions are: drying air temperature, 30°C, bed depth, 50cm, initial moisture content, 25% W. B..

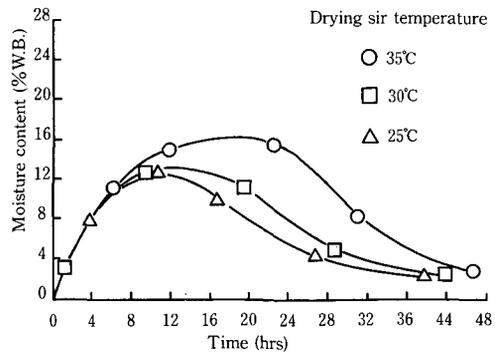


Fig. 5. Range of moisture content in drying (Experiment No. 3, 9, 15). Drying conditions are: airflow rate, 0.5m³/s·t, bed depth, 50cm, initial moisture content, 30%; W. B..

と比較して、水分差が大きく増加することを知った。従って、初期水分が高い材料をドライストアのような静置式乾燥装置を用いて水分18~20%の半乾状態まで乾燥する場合、材料の水分差を小さくさせるためには通風量を多く、通風温度を低く設定するか、またはローテーション（ビン換え）を行う必要がある。

最大水分差の値はこれまで述べてきたように材料の初期水分、通風量、通風温度および層厚さに影響を受ける。これら乾燥条件と最大水分差との関係を重回帰式で表すと以下ようになる。

$$M_{MAX} = -24.9 + 1.05 M_0 - 7.94 A + 0.35 T + 0.01 H \dots\dots\dots ②$$

$$r = 0.985^{***} \quad r(22, 0.1\%) = 0.629^{***}$$

ただし M_{MAX} = 最大水分差 (% W. B.)

M_0 = 初期水分 (% W. B.)

A = 通風量 ($m^3/sec \cdot t$)

T = 通風温度 ($^{\circ}C$)

H = 層厚さ (cm)

C. 最大水分差が生じるまでの所要時間

ドライストアを用いて高水分小麦を厚層状態で乾燥する場合、層内に最大水分差が生じる時期を予測することが必要になる。ドライストアにおいて規程水分まで乾燥する場合、および半乾状態で乾燥を中断して仕上げ乾燥機へ移す場合でも材料の水分差はできるかぎり少ないことが望ましい。大きな水分差が生じた場合はローテーション操作を行って水分差を減少させるが、これを行う時期の決定を誤るとローテーションの効果が発揮されなくなる。材料初期水分と乾燥条件から最大水分差が生じる時期を予測することが可能になればローテーションを行う時期を適確に求めることができる。最大水分差が生じるまでの時間は材料の初期水分、通風量、層厚さおよび平衡水分に影響を受ける。平衡水分は通風空気の温湿度から計算できる。これら乾燥条件と最大水分差が生じるまでの所要時間は以下の重回帰式で表すことができる。

$$\theta_{MAX} = 8.80 + 0.53 M_0 - 12.0 A + 1.02 M_E + 0.01 H \dots\dots\dots ③$$

$$r = 0.948^{***} \quad r(22, 0.1\%) = 0.629^{***}$$

ただし θ_{MAX} = 最大水分差が生じるまでの所要時間 (hr)

M_0 = 初期水分 (% W. B.)

A = 通風量 ($m^3/sec \cdot t$)

M_E = 平衡水分 (% W. B.)

H = 層厚さ (cm)

D. 最大水分差が生じた時の最下層水分

ローテーションを行う時期として層内に最大水分差が生じた時点が考えられる。この時間問題になるのが最下層の材料水分である。ローテーションを行う時点での最下層水分は過乾燥を防ぐために仕上げ時の小麦の規程水分 (12.5% W. B.) 以上であることが望まれる。

Fig. 6 に試料層内部に最大水分差が生じたときの最下層 (最下段) 試料水分を示した。本図より、最下層試料水分は通風量が少なく、通風温度が高く、初期水分が低いほど低い値になることが分かる。なお、初期水分の違いによる影響は比較的少なかった。

試料層に最大水分差が生じた時の最下層の試料水分を求める式は以下の通りとなった。

$$M_B = 20.1 + 5.54 A - 0.24 T - 0.01 H \dots\dots ④$$

$$r = 0.846^{***} \quad r(23, 0.1\%) = 0.618^{***}$$

ただし M_B = 最下層試料水分 (% W. B.)

A = 通風量 ($m^3/sec \cdot t$)

T = 通風温度 ($^{\circ}C$)

H = 層厚さ (cm)

E. 試料層の圧力損失

ドライストアを用いて穀物を乾燥する場合、乾燥過程で通風量に変化することが認められている。これは乾燥過程で材料の圧力損失が変化することに起因していると考えられる。特に高水分小麦を乾燥する場合は乾燥過程で小麦が収縮するとともに粒の表面の摩擦係数が減少し、かさ密度が増加することによって圧力損失が増加し、通風量が減少するものと

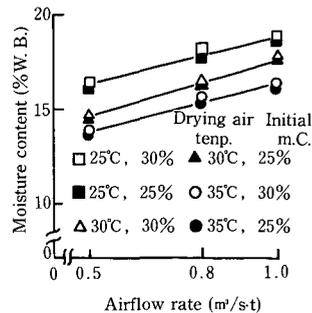


Fig. 6. Moisture content of bottom layer at maximum range of moisture content between bottom and top layer (Experiment No. 1 ~ 18). bed depth, 50cm.

考えられる。

Fig. 7に乾燥過程の試料層の圧力損失を示した。本図より圧力損失は試料水分の減少に伴って直線的に増加することが分かる。

圧力損失は試料厚さにも影響を受け、本実験に於いてもFig. 8に示すように試料層厚さの増加に伴って指数関数的に増加することを知った。

IV. 適 要

高水分小麦をドライストアのような静置式乾燥装置によって厚層状態で乾燥を行う時の基礎資料を得る目的で実験を行った。試料の初期水分を25及び

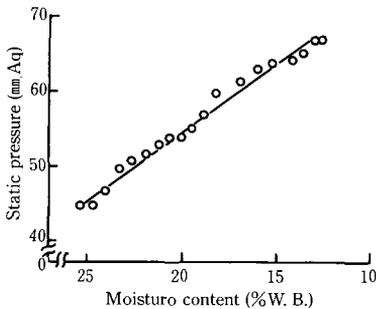


Fig. 7. Relation between moisture content in drying and static pressure in plenum chamber (Experiment No. 24). Drying conditions are: drying air temperature, 30°C, airflow rate, 0.5m³/s·t, bed depth, 70cm, initial moisture content, 25% W. B..

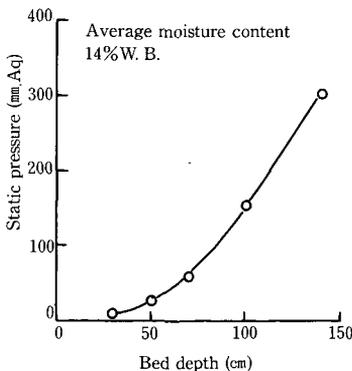


Fig. 8. Relation between bed depth and static pressure in plenum chamber. Drying conditions are: drying air temperature, 30°C, airflow rate, 0.5m³/s·t, initial moisture content, 30% W. B..

30%, 層厚さを30~140 cmとした。通風温度は25, 30, 35°Cの3段階, 通風量は0.5, 0.8, 1.0 m³/sec·tの3段階とし, 合計29の条件で実験を実施した。その結果を要約すること以下のとおりである。

1) 試料層内の小麦の平均水分は18%まではほぼ直線的に低下し, 乾燥時間を変数とすると一次式で回帰させることができた。

2) 乾燥中に試料層内に生ずる最大水分差とそれが発現するまでに要する時間は試料初期水分, 通風温度および通風量に影響をうけ, これら要因との重回帰式を求めた。

3) 乾燥中の試料層内圧力損失は材料の水分が低下するのに伴って直線的に増加した。

引用文献

1. BECKER, H. A. and SALLANS, H. R.: A Study of Internal Moisture Movement in Drying of the Wheat Kernel. *Cereal Chem.*, **32**: 212-226. 1955
2. SPENCER, H. B.: A Revised Method of the Wheat Drying Process. *J. Agric. Eng. Res.*, **17**: 189-194. 1972
3. 松田従三, 伊藤和彦ら: カントリーエレベータに付設されたドライストアに関する研究 (第1報). *農業機械学会誌* **36**(4): 543-548. 1975
4. 松田従三, 伊藤和彦ら: カントリーエレベータに付設されたドライストアに関する研究 (第2報). *農業機械学会誌* **37**(2): 217-221. 1975
5. IKEUCHI, Y., ITOH, K. and MATUDA, J.: Effect of Drying Conditions in Multi-stage Drying on Qualities of Wheat and Barly. *J. Fac. Agric. Hokkaido Univ.*, **59**: 1-16. 1978
6. BOWDEN, P. J., LAMOND, W. J., and SMITH, E. A.: Simulation of Near ambient Grain Drying. *J. Agric. Eng. Res.*, **28**: 279-300. 1983

Summary

In order to obtain basic data on the drying characteristics of high moisture content wheat by deep-bed dryers such as "Dry Store". Experiments were performed under the following conditions: initial moisture content-25 and 30% W. B.; drying air temperature-25, 30 and 35°C; airflow rate-0.5, 0.8 and 1.0m³/sec·t; bed depth-30, 50, 70, 100 and 140cm.

The following results were obtained:

(1) Average moisture content decreased by the same ratio from the initial moisture content to 18% W.B. It can therefore, be calculated from the drying time by using a regression line equation.

(2) The Maximum value of moisture content difference and the time required to reach to the

maximum value were affected by the initial wheat moisture content, drying air temperature and airflow rate. They can be calculated from those factors by using multiple regression curve equations.

(3) Static pressure loss in drying constantly increased as the wheat moisture content decreased.