

通風乾燥による籾の厚層乾燥特性について

亀 岡 孝 治

Deep-Bed Drying Characteristics of Rough-Rice

Takaharu KAMEOKA

1. 緒 言

熱および水分平衡が仮定出来る薄層における穀類の乾燥理論は、HENDERSONら^{1,2)}によって体系づけられた。一方、厚層での穀類の乾燥解析は、この薄層乾燥特性あるいは薄層乾燥実験により得られた乾燥定数(拡散係数)を用いて考えられるのが普通である。薄層乾燥特性あるいは乾燥定数(拡散係数)等の薄層乾燥に関わる物性値決定のための研究は数多いが、厚層での乾燥特性に関する研究は数少ない^{3,4,5)}。籾についても薄層における乾燥定数の決定のために数多くの研究がなされたが^{6,7,8,9,10)}、厚層乾燥特性を乾燥条件と共に正確に測定した例は非常に少ない^{5,11,12,13)}。

実際の乾燥が厚層で行われる事、厚層乾燥過程で生じる諸現象の解明に目的が置かれている事等を考慮すると、厚層の乾燥過程で生じる現象を踏まえて薄層乾燥実験または乾燥に関わる物性値の決定がなされねばならない。

そこで、筆者は、通気乾燥における厚層乾燥の解明の手始めとして、人口乾燥空気条件による、高さ方向の堆積層内乾燥速度分布(水分分布、層内空気温度分布)の経時変化を得るために、乾燥装置を試作し、その乾燥装置の特性を調べた。次に、籾を用いた通気乾燥特性の経時変化を一定絶対湿度条件の下で、人口空気の温度条件、風量条件を変えて測定した。乾燥特性として、乾燥過程における 1) 籾重量 2) 乾燥速度(計算値)、3) 層内温度分布、4) 体積変化、および乾燥前後の籾の 5) 水分、6) かさ密度を求めた。また、別途試作した分割層実験用試料容器を用いて乾燥過程における堆積層内重量分布を測定した。

本稿では、試作した装置の特性と、これらの測定結果

について報告すると共に、重回帰分析を用いて、乾燥条件との相互関連性について考察した。

2. 実験装置および方法

1. 実験装置の概略 本実験には、筆者が試作した通気乾燥装置を使用した。Fig. 1 に実験用乾燥装置全体の概略を示した。乾燥装置は、空気の流路順に示せば、除湿部⑤、送風機部⑦、ヒータ部⑩およびプリナム・チャンバー部(A)の4主要部から構成され、これに計測機器類が付属している。除湿部は、冷凍機②(TAKAGI製、空冷式0.2Kw)の蒸発器③を利用して水分を除去する方式を用い、絶対湿度を一定に保った。蒸発器に付着した水分は、受け皿④で回収した。この装置に組み込んだ送風機⑦(西村電気製、誘導伝導式NB8型、最大出力0.75Kw)の最大風量は、61m³/hである。実験条件の流量設定は、流量計⑬(日本フローセル製、FLT型、流量範囲12~60m³/h)を見ながら、吸い込み口端に設けたスリット⑥で吸い込み口風量を制限して行った。流量計の測定誤差は、最大流量に対し±2.5%である。

ヒータボックス⑩内には、それぞれ最大容量3KWのベースヒータ⑧とコントロールヒータ⑨を組込んだ。実験条件に応じて、前者は可変トランスでヒータ電圧を調整し、後者は湿度コントローラ(千野製、NA163型、PID制御方式)で、プリナム・チャンバー内空気温度を検出(検出端:白金抵抗体)して、ヒータの電源電圧を制御した。プリナム・チャンバー部における空気温度の制御範囲と設定値に対する変動幅は、最大流量で(30~70)±0.2°Cであった。これらのヒータは、筆者の実験条件に対し、安定した加熱能力を持ち、また十分な精度で制御可能なことを予備実験で確認した。

プリナム・チャンバー⑬(内径39.8×39.8×90cm)に入った空気は、ダクト⑭内の整流格子⑮で整流され、

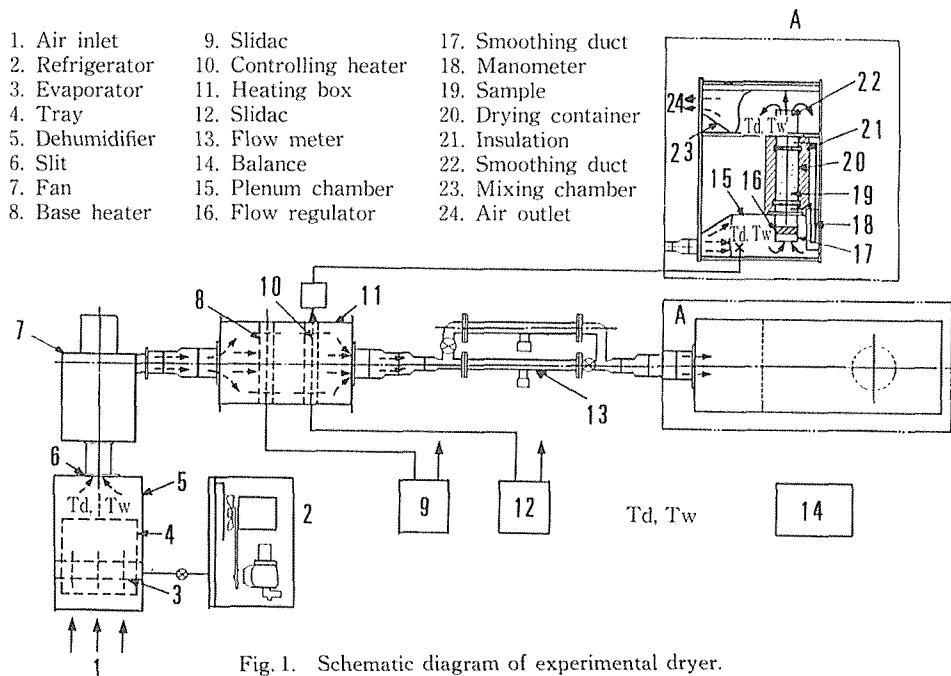


Fig. 1. Schematic diagram of experimental dryer.

試料容器⑳, 排風ダクト㉑およびミキシング・チャンパー (内径 $39.8 \times 39.8 \times 90$ cm) ㉒を経て, 排風口㉓から排出される。試料容器内を通過する空気の流れ損失は, 試料容器上部と下部の静圧差を試作したマンオメータ㉔ (測定範囲 $0 \sim 300$ mmAq) を用いて測定した。

2. 試料容器 試料容器㉑には, 2種類の容器を試作して用いた。Fig. 2に2種類の試料容器(A)および(B)の概略図を示した。試料容器(A)は, 内径 190 mm ϕ , 高さ 500 mm のアクリル・パイプの底面に目開き 2 mm のステンレス製網をネジおよび接着剤を用いて固定したもので, 厚層を一層とみなした全層実験用試料容器である。試料容器(B)は, 同径のアクリルパイプを高さ 50 mm で

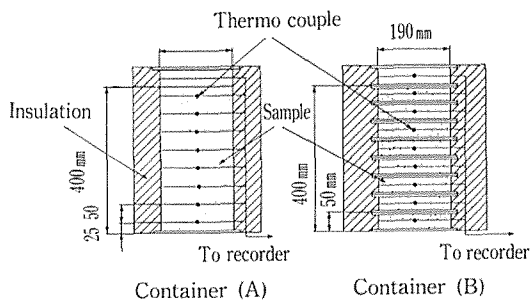


Fig. 2. Schematic diagram of container (A) and (B).

切断して, その底部にステンレス網を張ったもので, 厚層の分割層の乾燥特性を調べるために10個を1単位として用いる分割実験用試料容器である。後者を用いることにより, 乾燥過程における全層実験に対応した層別水分分布の経時変化を測定する事が出来る。これらの容器の接続部分には, 厚さ 5 mm のゴム・パッキンを挟み, 4個の蝶ネジを用いて空気の漏れを防止した。

3. 計測関係 (a) 試料重量 乾燥過程における試料重量の変化は, 一定の時間間隔をおいて試料容器をダクト部分から取り出し, 台秤㉕ (村山製, AS三型, 秤量 20 kg 感量 $1/20000$, 最小目盛り 1 g) で測定した。試料容器に装着した熱電対の重量誤差に及ぼす影響を考慮し, 熱電対の束と秤量台上の試料容器の位置を定めて測定した結果, 秤量 10 kg に対し, ± 1 g 以内に誤差範囲は収まった。

(b) 堆積層内温度分布 靱堆積層の垂直方向温度分布の経時変化を測定するために, 試料容器底部から 50 mm 高さ毎に直径方向に内径 2 mm ϕ の真ちゅう管を挿入し, さらにその管内に 0.1 mm ϕ の銅-コンスタンタン熱電対を通して中心部でその先端 (感温部) を管外に取り出し, 接着剤で絶縁固定した。これらの熱電対の起電力は増幅器 (東亜電波工業製, ET 1200型) により連

続記録し、JIS規格の温度換算表を用いて換算した。

(c) 乾燥装置内各部の温湿度 実験装置内空気の温湿度を測定するための乾球と湿球の設置箇所をFig.1の T_d と T_w で示した。相対湿度の測定には、市販の温湿度発振器(千野製, RO20-10型, 抵抗式)を用いた。ブリナム・チャンバー, およびミキシング・チャンバー内には、試作した熱電対式乾湿球温度計を併用し、試料容器入口および出口空気温度を測定した。

これらの乾湿球の示度をアスマン式乾湿球温度計で検定した結果、当実験の測定範囲(30~50°C)では、発振器の示度が約1°C高い事が判明し、これを補正した。熱電対乾湿球形の示度は、アスマン式乾湿球形と良く一致した。

ブリナム・チャンバー部の乾湿球温度は、2ペン・レコーダ(横河製, 3047型), その他は、打点式記録計(千野製, EH型)2台に連続記録させた。

(d) 水分測定 乾燥過程における堆積層内水分分布の変化を知るために、予備実験として先ず分割層実験を行い、各層から試料10gを3回採取し標準法(105°C5時間法)で、これらの平均水分を求めた。次に各層の水分を初期重量, 初期水分および重量変化より推算し、前者の結果と比較したところ、両者の差は0.5%以内に収まり、後者の測定法の信頼性が確かめられた。このため、特に異常が検出されない限り、重量測定より推算する方法を採用した。

また、試料容器に籾を堆積する直前、試料10gを3回サンプリングし、標準法でこれらの平均水分を求め、この値を初期水分とした。

4. 実験条件 Table 1(A), (B)に乾燥条件(入口空気条件), 籾の初期条件, 静圧差および乾燥条件を示した。

乾燥条件は、実際の乾燥装置で用いられる温度条件, 風量条件を考慮して設定し、温度条件は30~50°Cの範

Table 1(A). Drying conditions. (Using a container of 40 cm depth.)

Run No.	Inlet air condition				Initial grain condition			Pressure drop (mmAq)	Drying time (hr)
	Flow rate (m ³ /hr)	Temp.(d) (°C)	Temp.(w) (°C)	Absolute humidity (kg/kg)	M. C. (% w.b.)	Temp. (°C)	Bulk density (kg/m ³)		
1	40	30	2.0.	0.0105	21.3	23.5	579.2	48	16.0
2	40	40	23.5	0.0114	21.1	24.0	577.8	48	10.5
3	40	50	25.5	0.0105	20.7	24.0	571.6	49	7.5
4	20	30	19.8	0.0103	20.4	22.5	551.9	18	27.5
5	60	30	19.8	0.0103	20.4	23.0	560.6	120	10.0
6	40	30	20.5	0.0112	21.0	7.0	572.2	58	8.0
7	40	40	23.5	0.0114	20.7	6.2	555.3	57	7.3
8	40	50	26.5	0.0122	21.9	6.2	559.5	50	6.5
9	20	30	19.5	0.0098	20.3	6.6	556.4	18	9.0
10	60	30	21.5	0.0125	21.2	7.0	563.8	128	7.0

Table 1(B). Drying conditions. (Using 8 containers of 5 cm depth.)

Run No.	Inlet air condition				Initial grain condition			Pressure drop (mmAq)	Drying time (hr)
	Flow rate (m ³ /hr)	Temp.(d) (°C)	Temp.(w) (°C)	Absolute humidity (kg/kg)	M. C. (% w.b.)	Temp. (°C)	Bulk density (kg/m ³)		
1	40	30	19.8	0.0103	21.3	23.9	553.5	50	12.50
2	40	40	23.5	0.0114	20.7	23.5	571.8	46	10.50
3	40	50	26.4	0.0121	19.8	23.3	567.6	42	7.50
4	20	30	20.0	0.0105	19.7	23.8	567.0	16	13.00
5	60	30	19.5	0.0098	18.3	20.8	568.6	110	7.50
6	20	30	20.5	0.0112	21.7	7.5	539.4		0.25
7	20	30	20.3	0.0110	21.6	8.1	541.2		0.91
8	20	30	20.0	0.0105	21.8	7.5	571.7		1.50

囲に、また風量条件、実用の通気乾燥からカントリー・エレベータ等に用いられる大風量を想定し、 $20 \sim 60 \text{ m}^3/\text{h}$ の範囲で設定した。絶対湿度と堆積高さは一定とし、その値はそれぞれ、 $0.011 \pm 0.0010 \text{ kg}/\text{kg}$ 、 40 cm であった。Table 1 (A), (B)に示すように、同一温度および風量に対し、試料容器(A)および(B)も用いる実験を行った。試料容器(B)を用いる実験は、主に水分分布の経時変化を知るためのものである。

5. 乾燥操作 冷凍機、送風機およびヒータを作動させ、プリナム・チャンバ内空気の乾湿球温度が設定値に達し、安定するのを確認した後、ダクト部分に試料の入った試料容器を固定し、素早く流量設定を行った。流量設定が終了した時刻を乾燥開始時刻と定めた。

水分決定のための重量測定要した時間は、全層実験において約1分、分割層実験においては約4分であった。このため、全層実験の重量測定間隔は、乾燥開始後2時間は0.25時間、乾燥時間2時間から5時間は0.5時間、その後は1時間とした。また、分割層実験の場合は、乾

燥開始後5時間において、測定間隔は0.5時間とした。この乾燥中断時間の全乾燥過程への影響は、検証実験により、影響が無視出来る事が確認された。

6. 実験材料 本実験に供した試料は、短粒種の日本晴であり、1979年10月中旬に東京大学付属田無農場で収穫し、収穫直後東京大学農学部農業工学科内の冷蔵庫に保蔵した。収穫時の籾水分は約24% (w. d.) であった。

3. 実験結果

1. 乾燥プロセスの概略 Fig. 3に、乾燥プロセスにおける籾の水分、乾燥速度、体積および堆積層内温度分布の経時変化を入口と出口の空気条件に示した。乾燥空気条件は、乾燥温度 30°C 、風量 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ である。同乾燥条件下における試料容器(A)と(B)を用いた実験結果より、図中には、堆積層の最上部層、中層、最下層の3層の水分変化曲線を示した。籾水分は、3者共指数関数的に減少する傾向を示した。また、乾燥時間3時間における最上部層と最下部層との間の水分差は4.0% d. b. であっ

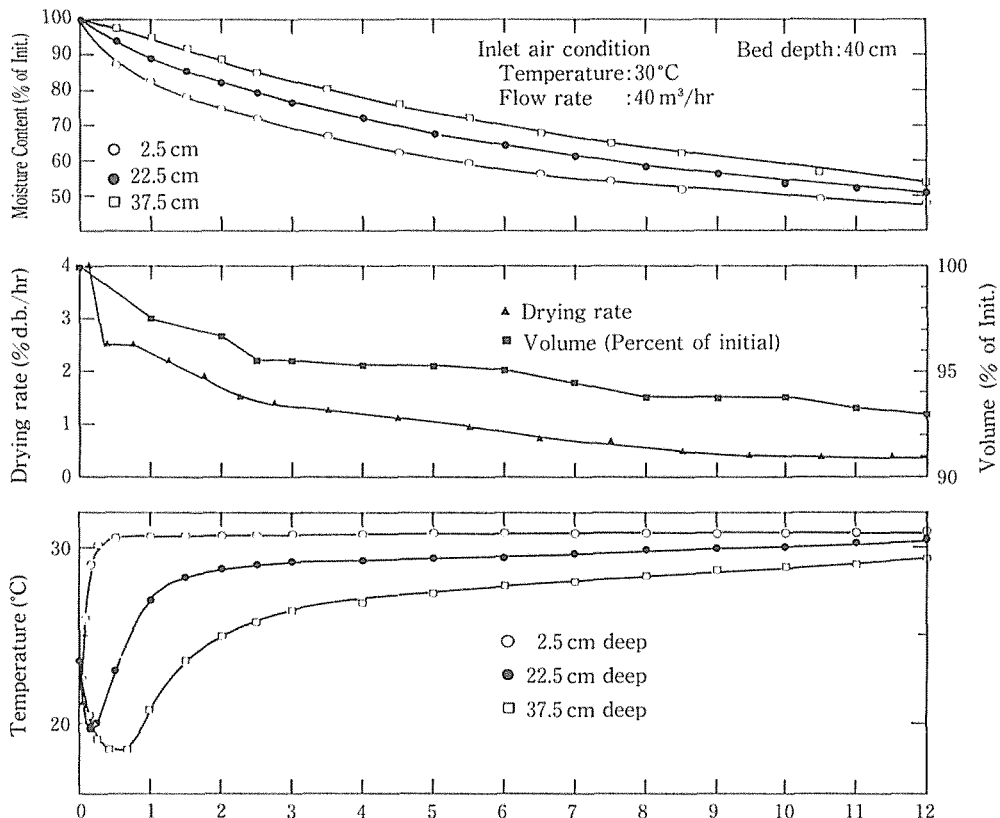


Fig. 3. Drying characteristics of rough rice (Initial grain temp.: 23.5°C).

た。

籾の水分曲線から計算して得られた乾燥速度曲線を図中に示した。乾燥速度は、乾燥開始直後急激に増大し、乾燥時間0.25時間より約1時間乾燥速度は一定となり、見かけの恒率乾燥を呈したが、これ以降は指数関数的に減少する傾向を示した。

容積も乾燥の進行と共に減少し、乾燥終了時の収縮率(初期容積に対する任意時間の容積の割合)は、92.8%であった。

入口乾燥空気の乾球温度、および湿球温度は、全乾燥時間を通じて一定温度に制御された。出口空気温度は、乾燥時間の経過と共に上昇する傾向を示した。

堆積層内空気温度は、乾燥開始直後、全層に渡って入口乾燥空気の湿球温度以下に下降し、その後最上層より順に上昇する傾向を示した。最上層の温度上昇の開始時間は、乾燥開始後約0.75時間であった。

2. 厚層乾燥特性 (A) 水分分布 プリナム・チャンパー入口空気の風量を一定値(40 m³/h)とし、入口乾燥乾燥空気温度を30°C、40°C、50°Cに変化させた場合

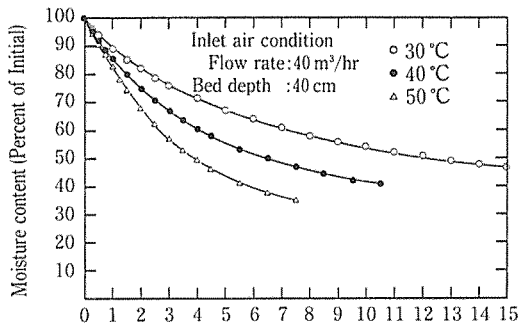


Fig. 4(a). The effect of temperature on the rate of drying.

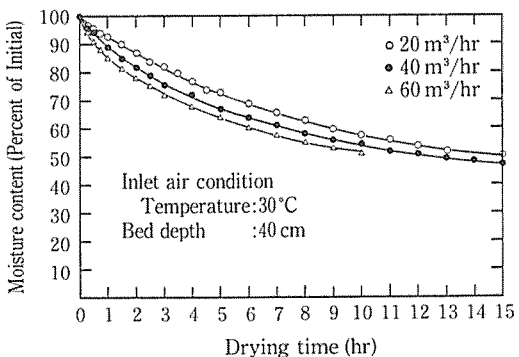


Fig. 4(b). The effect of flow rate on the rate of drying.

の水分残存率の変化を Fig. 4 (a) に、また入口空気温度を一定値(30°C)とし、入口乾燥空気の風量を 20 m³/h, 40 m³/h, 60 m³/h と変化させた場合の水分残存率の変化を Fig. 4 (b) に示した。使用した籾の初期水分値が異

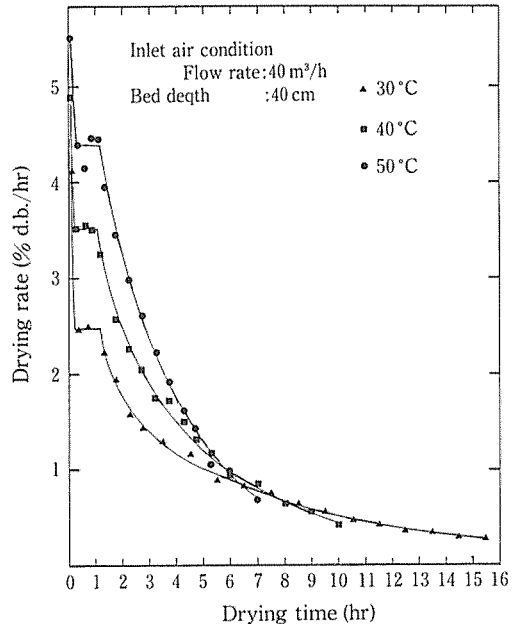


Fig. 5(a). The effect of temperature on the drying rate.

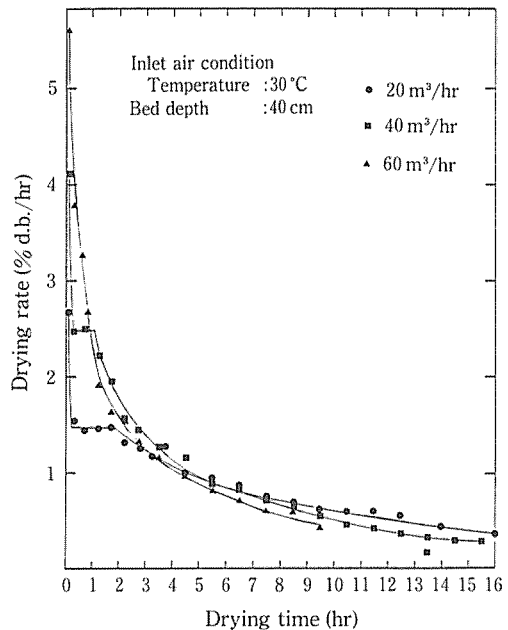


Fig. 5(b). The effect of flow rate on the drying rate.

なるため、縦軸は初期水分に対する水分割合を百分率で示し、比較を明瞭にした。

すべての曲線は、乾燥の進行と共に指数関数的に減少した。Fig. 4 (a)における3条件間の差異は、全乾燥時間において顕著で、入口空気温度が高いほど、籾水分の減少度合いが大きく、乾燥が速く進行する事が示された。一方、Fig. 4 (b)より乾燥時間1時間においては、風量が多い程籾水分減少度合いは大きく、その後は3者共同様の傾向で減少する事が示された。

(b) 乾燥速度 乾減率 (%/h, d. b.) を乾燥速度と定義すれば、乾燥速度曲線は水分変化曲線からの計算値より得られる。Fig. 4 (a)より得られた乾燥速度曲線をFig. 5 (a)に、Fig. 4 (b)より得られた乾燥速度曲線をFig. 5 (b)に示した。

すべての条件下で、乾燥速度は乾燥開始直後に急激に上昇して最大値に達し、乾燥時間15分より一定時間、見かけの恒率乾燥期間が現れた後、指数関数的に減少した。Fig. 6において、乾燥速度は乾燥開始直後入口空気温度が高い程大きな値を示し、乾燥時間15分より、3者共約1時間見かけの恒率乾燥を呈した。その後、乾燥時間6~8時間より後には、乾燥速度は逆の傾向を示し、入口空気温度が低い程大きな値を示した。Fig. 7の場合、乾燥開始直後、風量が多い程乾燥速度は大きな値を示し、見かけの恒率乾燥を呈したのち3者とも同様の軌跡で指数関数的に減少した。見かけの恒率時期の長さは、風量が多い程短くなり、最大風量(60 m³/h)においては、この期間は認められなくなった。

(c) 体積変化 各測定時間での籾体積高さの初期籾堆積変化とした。体積変化を入口空気風量条件が一定(40 cm)に対する割合を百分率で表示したものを体積変化とした。体積変化を入口空気風量条件が一定(40

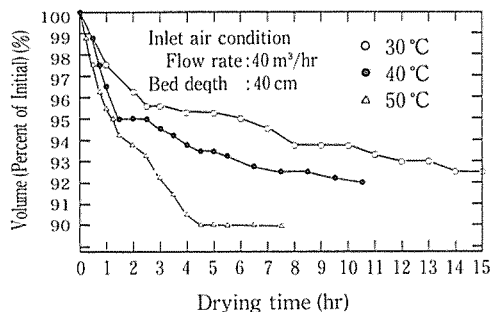


Fig. 6(a). The effect of temperature on the volume (Percent of Initial)

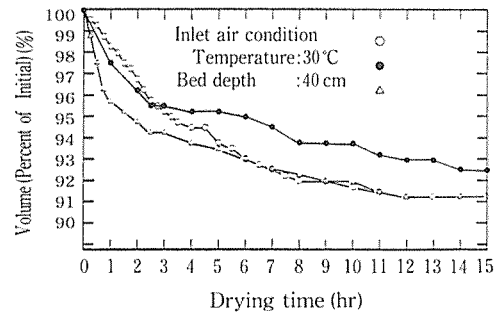


Fig. 6(b). The effect of flow rate on the volume (Percent of Initial)

m³/h)の下で空気温度をパラメータとして示したものをFig. 6 (a), 逆に空気温度条件が一定(30°C), 風量条件をパラメータとして示した図をFig. 6 (b)とした。Fig. 6 (a)の場合、乾燥初期(乾燥時間1.5時間まで)に体積は急激に減少し、その後の変化は入口空気温度が低い程緩やかな減少曲線を描いた。体積変化がなくなり一定体積値となる乾燥時間およびその値は、入口空気温度条件30°C, 40°C, 50°Cに対し、それぞれ乾燥時間14時間で92.5%, 乾燥時間11時間で92%, および乾燥時間4.5時間で90%であった。Fig. 6 (b)の場合も同様、初期乾燥時間においては風量が多い程体積は急激に減少した。乾燥時間6時間以降になると、3者共体積変化の経時変化はほぼ等しい傾向を示し、乾燥時間15時間で平衡状態に達した。この時の収縮率は、風量条件40 m³/hに対して92.5%であり、風量条件20 m³/hおよび60 m³/hに対しては91.3%であった。

(d) 堆積層内空気温度分布 堆積層内空気温度分布の経時変化をFig. 7 (a), (b), (c)およびFig. 7 (a), (b), (c)およびFig. 8 (a), (b), (c)に示した。堆積層内温度分布は、層内温度測定箇所8ヶ所のうち3ヶ所、すなわち最上部層(37.5 cm高さ), 中層(20 cm高さ), および最下部層(2.5 cm高さ)の経時変化で示した。

Fig. 7 (a), (b), (c)は、入口空気の風量を一定値(40 m³/h)として、空気温度条件をそれぞれ30°C, 40°C, 50°Cとしたもの、またFig. 8 (a), (b), (c)は、入口空気の温度条件を一定値(30°C)とし、風量をそれぞれ20 m³/h, 40 m³/h, 60 m³/hとしたものである。すべての場合に乾燥時間3時間までの空気温度の経時変化を示した。乾燥時間3時間以降の傾向は、すべて同様となり、最下部層から最上部層への直線的な温度分布を有し、温度分

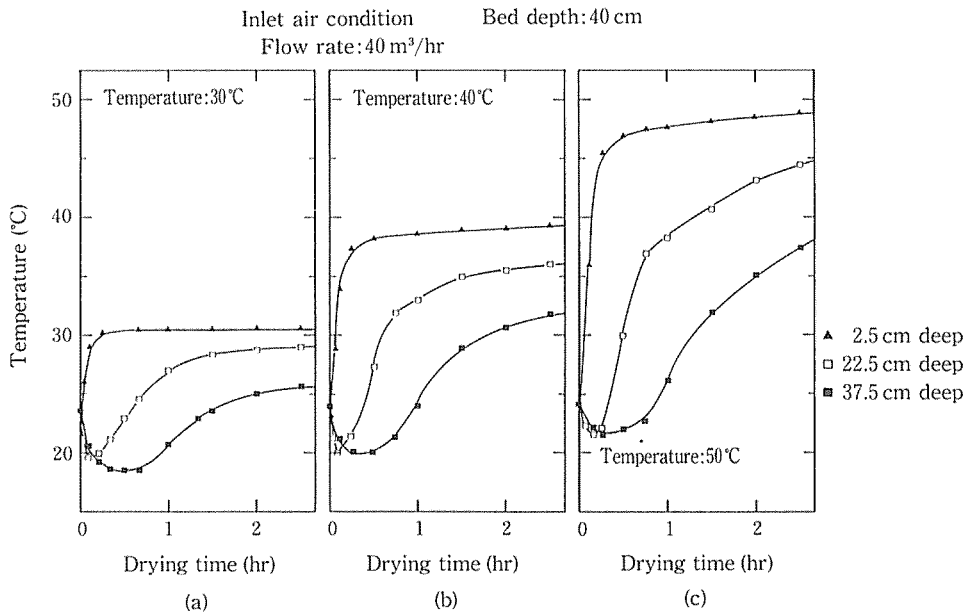


Fig. 7. Temperature distribution during drying.

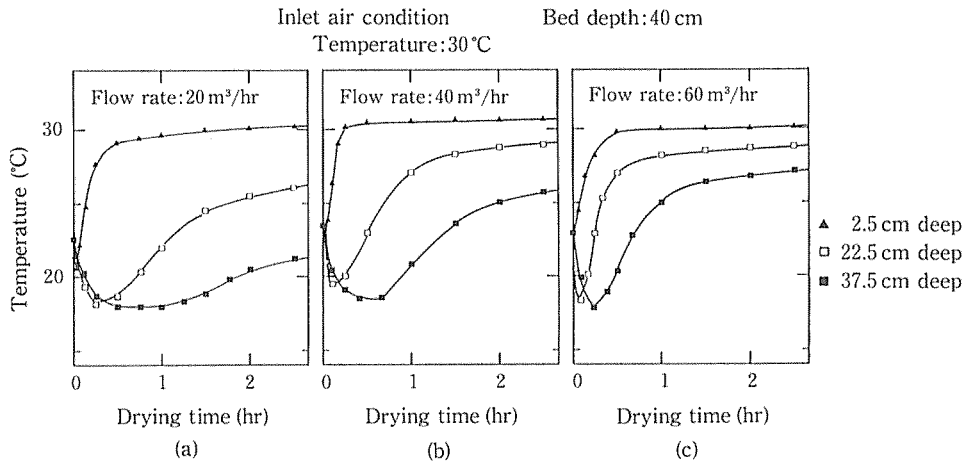


Fig. 8. Temperature distribution during drying.

布幅は乾燥の進行につれて小さくなり、最下層から順に設定温度に収束し、温度分布幅は風量大きい程小さく、入口空気温度条件が低い程小さくなった。以下に、乾燥時間3時間以内の現象について述べる。

Fig. 7 (a), (b), (c) の場合、乾燥開始と同様に最下層から最上層まで順に、層内空気温度は一旦降下し、続いて上昇を始める。入口空気温度が高い場合、最下層において、この温度下降現象は認められず、乾燥開始と共に空気温度は上昇し始める。最上昇の空気温度は、乾燥時間

20分付近まで降下を続け、最降下点温度に達する乾燥時間20分より約40分間一定温度を保ち、続いて上昇を始める。この傾向は(a), (b), (c)とも共通で最降下点温度は、それぞれ18.5°C, 20°C, 21.5°Cであった。Fig. 8 (a), (b), (c)についても、Fig. 7と同様の傾向が認められた。しかし、最上層温度は、風量条件に拘らずほぼ等しい最降下点温度(約18°C)に達し、その後一定期間等しい温度を保ち、続いて上昇を始めた。この時の最降下温度は、Fig. 8 (a), (b), (c)に対し、それぞれ1時間、40分、20分

であった。

Fig. 7 および Fig. 8 において、最降下点温度は、すべての場合に入口空気の湿球温度より $1^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ 低くなる事が判明した。(Table. 1 参照)

3. 堆積層内乾燥特性分布 (a) 水分分布 40 cm 高さの堆積を 5 cm に分割し、各分割層の水分の経時変化を Fig. 9 に示した。実験に用いた糶の初期水分は、24.6% d. b. であった。

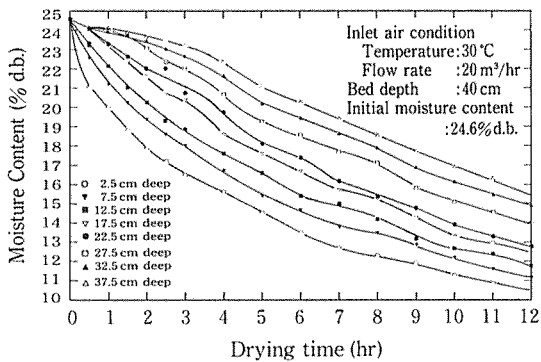


Fig. 9. Variation of rate of drying with depth of bed.

乾燥開始と共に、下方の5層において顕著な水分減少が認められ、その度合は最下層で最も大きく、上方に移るにつれて順に小さくなった。特に、最上層を含む上方の3層においては、乾燥開始より乾燥時間1.5時間に至る期間中ほとんど水分減少は行われず、乾燥時間1.5時間の時初めて3層間に水分較差が現れ、顕著な水分減少傾向を示した。乾燥時間3時間を過ぎると、各層の水分減少傾向の間には大きな相違は認められなくなった。

全堆積層間の高さ方向の水分むらは、乾燥時間の経過と共に大きくなり、乾燥時間4時間の時最大値を示し、その後は徐々に減少した。水分むらの最大値は、7.0%であり、乾燥終了時とした乾燥時間12時間においても依然として5% d. b. の水分むらが認められた。

(b) 乾燥速度分布 堆積層全体を1つの層と見なした時の乾燥速度と、堆積を4層に分割した時の各分割層の乾燥速度の経時変化を、同じ乾燥条件で対比して Fig. 10 (a), (b) に示した。(a)図が全堆積層での乾燥速度であり、下図(b)が分割層での乾燥速度である。

全層においては、乾燥開始直後に乾燥速度は最大値となり、その後一定間見かけの恒率乾燥期間が認められる。

分割層においては、最下層での乾燥速度は乾燥開始直後最大となり、その後指数関数的に減少した。最大乾燥

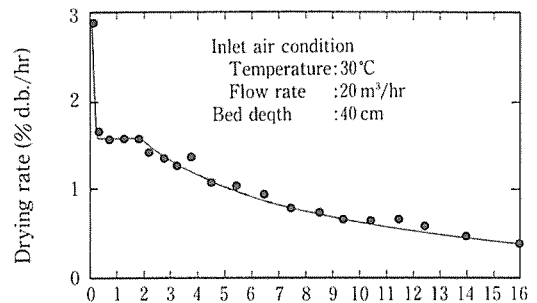


Fig. 10(a). Total drying rate in a 40 cm bed.

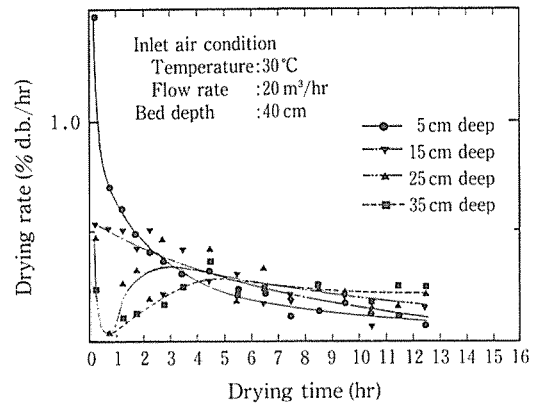


Fig. 10(b). Drying rate distribution during drying.

速度は、乾減率 5.3% d. b./h で、乾燥終了時の乾燥速度は 0.28% d. b./h であった。最下層から第2番目の層での乾燥速度も同様に指数関数的に減少したが、その最大値は 1.9% d. b./h であった乾燥終了時における乾燥速度は 0.55% d. b./h であった。これら2層での水分減少傾向に対し、上層の2つの層では乾燥初期の約1時間の乾燥速度はほとんど0であった。その後、両層共乾燥速度は増加傾向を示し、上から2層目の層では乾燥時間約3時間で、また最上層では乾燥時間約5時間で乾燥速度は最大値に達し、その後指数関数的に減少した。

(c) 堆積層内空気温度分布 初期糶温度条件 22.5°C での実験の典型的な堆積層内空気温度分布の経時変化を Fig. 11 に示した。空気温度は、乾燥開始と共に最下層より最上層に至るまで順に、一旦下降傾向を示し、続いて上昇した。最降下点温度およびその継続時間は、上部層ほど低く、かつ長くなった。その値は、それぞれ 18°C および40分であった。乾燥時間1時間で最上層空気温度が上昇し始め、この時点で堆積層内温度分布幅は最大となり、最上層と最下層との間の温度差は

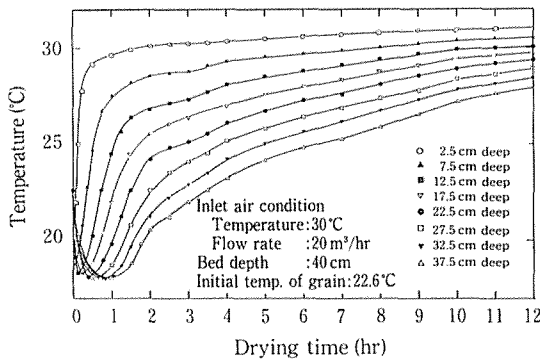


Fig. 11. Variation of temperature during drying.

11.5°Cであった。また、乾燥時間3時間で最下層空気温度も初期籾温度に達し、時間の経過と共に各層の空気温度が入口空気温度に収束する傾向を示した。

4. 考 察

1. 乾燥空気条件の乾燥速度への影響（全乾燥時間）

今回の実験でパラメータとして用いた乾燥空気温度条件および風量条件の、全乾燥時間を通じての乾燥速度への寄与率を定量的に調べるために重回帰分析^{14,15)}を行った。この結果、空気温度条件に対する相関は1%で有意であり、風量条件に関しては20%で有意、つまりほとんど有意でないことが判明した。

これは、絶対湿度を一定に保っている状態においては、乾燥空気の飽和水蒸気圧は温度により決定され、この飽和水蒸気圧が乾燥能力の重要な指標である事、また籾を含む穀類は、乾燥初期時間を除いて、粒子内部水分移動速度型の減率2段と考えられ、乾燥速度が極端に速い初期乾燥時間を除いては、ある必要風量さえ与えられれば充分で、必要風量以上の風量条件においては乾燥速度はその影響を受けないものと思われる。

2. 乾燥空気条件の乾燥速度への影響（初期乾燥時間）

初期乾燥時間1時間における乾燥空気温度条件、風量条件、および初期籾温度の乾燥速度への寄与率を求めた。この結果、3つの条件はどれも1%で有意である事が判明すると共に、初期籾温度は、空気温度や風量条件とは逆相関を示し、初期籾温度が低い程初期乾燥速度が大きくなる事が判明した。なお、初期籾温度を6°Cにした時、初期時間に見かけの恒率乾燥時期は認められず、凸の乾燥速度を示した。

これらの事実より、初期におけるみかけの恒率乾燥期

間は、初期籾温度が約20°Cにおいて、堆積層内部の高さ方向の乾燥速度の堆積として認められる現象である事（Fig. 10 参照）が判明した。また、乾燥温度条件および風量条件の乾燥速度への影響は大きく、寄与率は風量条件の方が高くなった。この理由は、以下の様に説明される。

空気温度条件の寄与率が高い理由は、前項ですでに述べたが、空気温度条件によって単位風量当たりの乾燥能力が決定され、粒子内部移動量が大きい時には、乾燥能力すなわち乾燥速度は空気風量条件により律速されると考えられる。また、風量条件が小さい時には、厚層においては上層においても飽和が生じ、上層乾燥速度がほとんど0になる事実からも、風量条件の初期乾燥への寄与率の高さが推定される。

3. 堆積層内温度分布への乾燥空気の影響（初期乾燥時間）

初期乾燥時間における堆積層内空気温度の降下現象による似た現象は、Boyce ら^{4,13)}により指摘され、最降下点温度は、Pseudo-saturation temperature と呼ばれている。実験結果より、初期乾燥時間において堆積層内温度降下現象が生じ、最降下点温度が一定時間一定値で持続される事が判明した。そこで、重回帰分析を用いて最降下点温度およびその持続時間と乾燥空気温度および風量条件との重相関を調べた。この結果、最降下点温度は乾燥空気温度条件だけで決定され、また持続時間は風量条件にのみ依存する事が判明した。

4. 初期乾燥時間における乾燥過程について 前項における結果の定性的な説明を以下に述べる。乾燥空気を次の3種類に分類し、実際の乾燥空気がこれら3種類の空気の混合物であると仮定する。

(a) 入口乾燥空気温度は t_i で、籾温度 $t_g = t_i$ の籾の乾燥に用いられ、出口空気温度 $t_o = t_{iw}$ (但し、 t_{iw} は入口空気湿球温度) として排出される空気。

(b) 入口乾燥空気温度は t_i で、籾温度 t_g まで顕熱変化を行った後、乾燥操作を行い、 $t_o = t_{gw}$ (但し、 t_{gw} は入口空気絶対湿度 H_i に対する乾球温度 t_g に対する湿球温度) で排出される空気。

(c) 両極端な性質を有する(a), (b)の空気の中間の性質を有するすべての空気の集合。

これらの条件の下では、当然 $t_i > t_g$, $t_{iw} > t_{gw}$ が成立する。また、(a), (b), (c)それぞれの空気の単位風量における割合をそれぞれ α , β , γ ($\alpha + \beta + \gamma = 1$) とする。

今回の風量条件下では、最上部層に(a), (b), (c)の混合空気である単位風量が到達するのに要する時間は、初期乾燥時間1時間に比べ非常に小さく、最上部層の温度降下は約15分で最降下点温度に達する。また、この最降下点温度 t_{min} は、 $t_i, t_{iw}, t_g, \alpha, \beta, \gamma$ に依存し、風量には依存しない値となり、 $t_{gw} < t_{min} < t_{iw}$ が成立し、最降下点温度 t_{min} は入口となる。ここに、 α, β, γ は初期籾充填状態、初期籾含水率、および層高さにより決定される。

また、最降下点温度 t_{min} の持続期間は、最上部層で乾燥操作が開始されるまでの時間であり (Fig. 10 参照)、乾燥空気条件に律速されると考えられ初期乾燥時間においては、空気温度が指標となる単位風量当たりの乾燥能力よりも、乾燥能力の伝達媒体である風量の方が最上部層の乾燥操作に大きな影響を及ぼす事になる。従って、入口空気温度が今回の実験の乾燥空気温度範囲 (30°C~50°C) では、最降下点温度 t_{min} は、風量条件によってのみ決定されると考えられる。

5. 今後の問題点

厚層乾燥解析のための基礎データとして、今回入口乾燥空気の温度、風量条件をパラメータとして厚層乾燥特性を示した。今後、入口乾燥空気湿度条件、堆積層高さ、初期籾水分および初期籾温度をパラメータとした更に詳しい厚層乾燥特性の把握が望まれる。また、厚層乾燥過程の解析に使用可能な種々の物性値を、乾燥条件の関数として、精度の高い実験から求める事が必要である。更に、薄層を積み上げる形の厚層乾燥モデルではなく、速度理論 (rate theory) に基礎を置いた厚層乾燥モデルの創造が望まれる。

以上、本稿では籾の厚層乾燥特性について報告した。厚層乾燥機構に必要な様々な物性値、および乾燥機構の解明などについては続報で述べる予定である。本報での計算には、東京大学大型計算機センターの計算機と日立制作所の統計計算プログラム・ライブラリを使用した。ここに記して謝意を表する。

6. 摘要

乾燥に影響を及ぼす諸因子と共に、籾の厚層乾燥特性を得するために、実験用通風乾燥装置を試作し、入口乾燥空気の温度条件、風量条件を変えて実験を行った。以下に、これらの条件と結果について要約する。

1. 試作した実験用乾燥装置、試料容器、および乾燥条件を Fig. 1, Fig. 2, Table 1 に示した Table 1 (a) には、全層乾燥実験、Table 1 (b) には、分割層乾燥実験の乾燥条件を示した。

2. 乾燥特性として、乾燥過程における 1) 試料重量、2) 乾燥速度 (計算値)、3) 堆積層内温度分布、4) 体積、乾燥前後の 5) 水分を求めた。籾の厚層乾燥特性の経時変化を Fig. 3 に示した。水分、乾燥速度、体積、堆積層内空気温度分布の経時変化を入口乾燥空気温度をパラメータとしてそれぞれ Fig. 4 (a), Fig. 5 (a), Fig. 6 (a), Fig. 7 (a), (b), (c) に示し、入口乾燥空気風量をパラメータとしてそれぞれ Fig. 4 (b), Fig. 5 (b), Fig. 6 (b), Fig. 8 (a), (b), (c) に示した。

3. 堆積層内水分分布、乾燥速度分布および堆積層内空気温度分析の経時変化を Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 に示した。この結果、乾燥初期時間に生じる見かけの恒率乾燥期間は、堆積層内部の各高さでの異なる水分変化が重なり合って生じる事が判明した。

参考文献

- 1) HUSTRULID, A. and A. M. FLIKKE: Theoretical Drying Curve for Shelled Corn, Trans. of the ASAE, 2(1), 112-114, 1959
- 2) HENDERSON, S. M. and S. PABIS: Grain Drying Theory (1), Temperature Effect on Drying Coefficient, J. Agr. Engng. Res., 6(3), 169-174, 1961
- 3) SIMMONDS, W. H. C., G. T. WARD and E. M'EWEN: The Drying of Wheat, Part 11, Through Drying of Deep Beds, Trans. Instn. Chem. Engrs., 31(3), 266-, 1953
- 4) BOYCE, D. S.: Grain Moisture and Temperature Changes with Position and Time during Through-drying, J. Agr. Engng. Res., 10(4), 333-341, 1965
- 5) ALLEN, J. R.: Application of Grain Drying Theory to the Drying of Maize and Rice, J. Agr. Engng. Res., 5(4), 363-385, 1960
- 6) HUSAIN, A., C. S. CHEN and J. T. CLAITON: Simultaneous Heat and Mass Diffusion in Biological Materials, J. Agr. Engng. Res., 18, 343-354, 1973
- 7) 細川 明, 本橋国司: 一粒の籾の乾燥特性, 農機学会誌, 33(1), 53-59, 1971
- 8) 中馬 豊, 村田 敏, 岩本陸夫: 穀類の乾燥に関する基礎的研究, 農機学会誌, 31(3), 250-, 1969
- 9) 西山嘉雄: モミ乾燥の基礎的研究, 東京大学博士論文, 3.2-3.34, 1974
- 10) 山沢新吾, 吉崎 繁, 前川孝昭: 農産物の乾燥に関する基礎的研究 (第2), 農機学会誌, 33(3), 279-1971

- | | |
|--|--|
| <p>11) 市村一男, 中山元司: 穀類の乾燥特性に関する研究, 第1報 小麦について, 農電研究所所報, 1, 77-97, 1961</p> <p>12) 市村一男, 中山元司: 穀類の乾燥特性に関する研究, 第2報 籾について, 農電研究所所報, 2, 109-150, 1961</p> <p>13) CHIEN, K. S., R. K. MATTHES and B. P. UERMA:</p> | <p>Dimensional Analysis of Seed-moisture Movement in Deep Bed Drying, Trans. of the ASAE, 14, 277-281, 1971</p> <p>14) 奥野忠一, 他: 多変量解析法, 日科技連, 25-152, 1971</p> <p>15) 日立製作所: HASP 統計計算ライブラリ, プログラムマニュアル, 153-163, 1973</p> |
|--|--|

Summary

An experimental dryer was constructed to clarify the drying characteristics of deep beds of cereal grains.

A static bed of 40 cm deep, initially at about 25.0% d.b. moisture content, was dried by ventilation with air at 3 constant flow rates (20, 40, 60 m³/h) with an absolute humidity of 0.01 kg/kg' at 3 constant temperatures (30, 40, 50°C).

Experiments were carried out on short grain rough rice in the deep bed to obtain the moisture content and temperature change at various distances from the bottom of the bed at each drying time.

The drying characteristics of rough rice—such as 1) moisture content of sample, 2) drying rate, 3) air temperature distribution in the bed, 4) moisture content before and after drying, etc—were obtained.

Two kinds of sample containers were prepared. One was 40 cm deep and was used for finding the average change of moisture content in the deep bed. The other consisted of 8 containers, each 5 cm deep, which were used to grasp the moisture content distribution in the deep bed.

The relationship between the drying conditions, such as air temperature, humidity and flow rate, and the drying characteristics of deep bed drying was discussed by the use of multiple regression analysis.