新型乾燥装置の乾燥性能について

清田正徳^{1,†}, 福富純一郎¹, 西 健織¹, 寺島紀男²

¹ 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部, ² 株式会社マルミ

Drying Performance of a New Type Drying Equipment

Masanori KIYOTA^{1,†}, Junichiro FUKUTOMI¹, Takeshi NISHI¹, and Norio TERASHIMA²

¹*Institute of Technology and Science, Tokushima University, 2-1 Minami-jyosanjima, Tokushima 770-8506, Japan*

²*Marumi Corporation, 230-1, Hanamen, Satoura, Naruto, Tokushima 772-0021, Japan*

By-product of tofu contains useful ingredients as well as water but it begins to smell quickly. Then it becomes industrial waste, but if it is dried, powders suitable for food material are obtained. A new type drying equipment is proposed for that purpose. It is composed of air heater, drying drum, classifying chamber and cyclone separator. Ceramic balls about 5 mm diameter are contained in the drying drum and move about at high speed entrained in the hot air. Wet materials are added to the drum by rotary feeder, dispersed by the action of balls and conveyed by the gas stream. At steady operating condition, fuel flow rate, air flow rate, temperature and humidity are measured. Drying is done mainly in the drum and partly in the classification chamber according to the obtained temperature drop. The measured humidity agrees well with the predicted value from the mass balance of steam. The energy used for evaporation of water in the material was about 80% of the provided energy. This dryer has the ability of drying wet materials in short time, continuously and efficiently without burning the material. But its drying capacity is relatively small and enlargement is necessary for industrial use.

Keywords: Wastes disposal, Dryer, Pneumatic conveyor, Dispersion, Ceramic ball

1. 緒 言

近年、環境問題がクローズアップされている状況下において、企業の生産活動から排出される産業廃棄物、生活汚物などの処理が、ますます重要な問題となっている。食品に関しては、産業廃棄物扱いとなる残飯やおから、焼酎かす、海産物などの廃棄物の処理に乾燥器を利用しようとするニーズがあるとされている [1]。一般に、被乾燥物により性質が異なるので、それぞれに適した乾燥器を選ぶ必要がある [2–8]。廃棄物の場合も全く同様である。このうちおからの処理については、単に焼却処分するのではなく、乾燥して乾燥粉末にしこれを食材として再利用することが考えられている。おからは、含水率がとても高く、付着性が強いなどの性質があるため、高温空気で乾燥しようすると、焦

げや変色が発生したり、さらには酸化、炭化まで生じることもある。焦げが発生すると、品質が低下して製品を食材として使用できなくなる。そこで、セラミックボールを封入した乾燥ドラムと分級チャンバ、サイクロン分離器よりなる新しい乾燥器を考案した。簡単な構造であり低コストでの製造が可能である。しかしながら現状ではおからの処理量は比較的小さく、産業用に使用するためには大容量化が必要であり、そのためには、性能を十分に把握しておく必要がある。そこで本報告では、開発した乾燥器の性能を調べるために、実験を行った。おからを投入して乾燥器を運転し、定常になった状態でおからの供給速度、供給燃料流量、空気流量、温度分布、湿度などのデータを得た。得られたデータを基に、装置全体のエネルギーバランスおよび水蒸気の質量バランスが成り立っているか調べる事により、得られた性能値に矛盾がないか検討するとともに、乾燥過程について考察した。

(受付 2008 年 5 月 17 日, 受理 2008 年 11 月 19 日)

1 〒 770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1

2 〒 772-0021 徳島県鳴門市里浦町花面 230-1

† Fax: 088-656-9082, E-mail: kiyota@me.tokushima-u.ac.jp

2. 実験装置および方法

2.1 新型乾燥装置と乾燥過程

今回開発した乾燥装置の概形と寸法を Fig. 1 に示す。本乾燥装置はホッパー部に付随する、被乾燥物を送り込むロータリーフィーダを除いて回転・駆動部分がなくシンプルな構造になっている。本体の大きさは 3050 mm×2167 mm×1211 mm であり、サイクロン分離器の上部に排気用の煙突がついている。乾燥機構を Fig. 2 に示す。被乾燥物であるおからはホッパーより投入し、ロータリーフィーダにより連続的に一定速度で下方の乾燥ドラム内（直径 400 mm、幅 140 mm）に送られる。乾燥に用いる熱風は熱風発生装置で発生している。ここでは燃料ガス（プロパン）をバーナで燃やして高温にしこれを用いて、下流部で流入する大量の空

Fig. 1 Drying equipment.

Fig. 2 Mechanism of drying.

気を加熱している。バーナ部で燃焼時に供給する空気を 1 次空気、下流で供給する空気を 2 次空気とする。乾燥室の入口温度が一定になるようにバーナを制御している。この熱風をノズルにより絞って高速流れとして乾燥ドラムに接線方向に流入させている。ドラム内には高速の旋回流が発生している。またドラム内には直径が 5 mm のセラミックボールを入れてあり、高速の気流により旋回している。被乾燥物はこの旋回流中に投入されるので、ボールの衝撃により粉碎されて分散し、気流により乾燥されながら運ばれる。おからは壁にくっつきやすく焦げが発生しやすいが、ボールが壁に当たる時にくっついたおからをかき落とす効果によって焦げが発生せずに乾燥が行われる。ボールの封入量は約 2 kg である。乾燥ドラムは上昇口によって分級チャンバにつながっている。従って、おからは気流によって乾燥ドラムから上昇口を通過して、分級チャンバに送られる。この行程で、比較的大きな乾燥物は内部まで乾燥されていないので、その自重で再び落下して、乾燥ドラム内に戻され、再度粉碎と乾燥を受けることになる。分級チャンバ内では熱風の上昇気流で乾燥物を気流乾燥させているが速度が速くなりすぎると被乾燥物が天井に付着したり、十分に乾燥されていない被乾燥物がそのまま排出されたりする。これを防ぐために、その断面を 400 mm×400 mm と広げて流速を十分に減少させるとともに、高さを 1170 mm とし十分な体積を確保している。分級チャンバでの気流乾燥によって水分が蒸発し軽くなった固体粉末はサイクロン分離器に流れてゆくが、十分に乾燥していない重いものはチャンバ内を下降する。吹き上げてくる熱風により再度気流乾燥され軽くなるとサイクロンに流れてゆく。サイクロンとチャンバは Fig. 1 で見るとチャンバ上部の点線の細長い矩形断面の通路でつながっており、排出ガスはサイクロンに周方向に流入させている。サイクロンでは水蒸気を含んだ空気と乾燥した粉末が分離される。サイクロン下部から製品が取り出され、水蒸気を含んだ空気は上方の煙突から外部に排出される。ところで、本乾燥器は分類 [2,3] としては、ドラム内でセラミックボールをベッド材とする流動層におけるような乾燥をさせたあと、気流により乾燥おからは運ばれているので、流動層乾燥器と気流乾燥器の中間的な乾燥器といえる。

2.2 測定装置および実験方法

被乾燥物としておからを用い、おから乾燥時と非乾燥時において以下の項目について測定した。これらの値はデータロガーによりパソコンに取り込んで監視と記録をした。

(1) プロワ入口の空気流量……おから乾燥時に JIS 規格 [9] に定められた形状の入口ノズルで測定

- (2)プロパンガス流量……おから乾燥時に熱風発生装置入口においてガス流量計で測定
- (3)乾燥ドラム入口の熱風量……ピトー管式流量計を用いて測定 (Fig. 1 参照)
- (4)乾燥器内の温度……おから乾燥時に乾燥器内の各点において乾燥器幅方向中央断面上でシース外径 2.2 mm と 1 mm の K 型熱電対を用いて測定
- (5)乾燥器内の圧力……おからを投入していない状態において器内各部で直径 1 mm の静圧タップを用いて壁面静圧の測定
- (6)乾燥器出口の湿度……おから乾燥時に水蒸気を含んだ排気流の相対湿度をサイクロン分離器上部の煙突内で測定
- (7)乾燥前と乾燥後のおからの水分含有量……ハロゲン水分計により測定. 試料約 20 g をハロゲンランプにより加熱して完全に乾燥させ, その質量変化から求めている. 値は湿量基準である.

3. 実験結果

3.1 本乾燥装置の基本性能

Fig. 1 に示した本乾燥装置を用いておからの乾燥実験を行った. 乾燥器に供給するおからは水分含有率 (湿量基準) が 78~80% であるが, これが乾燥装置を出ると 6~10% になっている. おからの乾燥器への供給速度は 50 kg/h である. おからの乾燥時間 (被乾燥物の滞留時間) は被乾燥物投入から目視による計測で約 5 秒である. 問題となる焦げも発生することなく連続運転することが可能であった. 得られた乾燥おからは 1 mm に満たない微細な粉末状態で食材として利用可能な状態である. Table 1 に主な測定結果をまとめている.

3.2 乾燥装置内部の温度分布

乾燥器内の温度測定のために, Fig. 3(a) に示す 22 カ所に熱電対を取り付けた. これらの測定値から描画ソフトにより等温線を求めた. サンプル点から任意の点の値を相関法 [11] により求めて等高線を得ている. その温度分布が Fig. 4 である. 座標軸は寸法を mm で表す. この図の左上部にサイクロンへ至る通路がある. 被乾

燥物であるおからを投入して運転している状態で, 乾燥器入口の温度は 350℃ であるが, 乾燥ドラム出口では 106~130℃ 程度となる. また上昇通路出口で 93~112℃ となり, 分級チャンバ出口では約 88℃ となっている. これらの高温部をたどって被乾燥物は運ばれると考えると, ドラム内での温度低下は 220℃ となる. また, 上昇通路部で約 18℃ の低下をし, 残り 24℃ の温度降下はチャンバ内で生じている. ガス温度の温度降下の際にガスが放出した熱は全ておからの水分の蒸発に使われているとすれば, 全体の 84% は乾燥ドラム内で生じていることになる. また通路部で 7%, チャンバ内で 9% が

Fig. 3 Measurement positions.

Fig. 4 Temperature distribution.

Table 1 Obtained results.

Feed rate	50 kg/h
Fuel flow rate	1.176 m _N ³ /h
Secondary air	260 m _N ³ /h
Water content	Before drying 78~80%
Water content	After drying 6~10%
Air	100 kPa, 30℃, humidity 60%
Exhaust gas	100 kPa, 79℃, humidity 35%

蒸発している事になる。ドラム内ではおからを高速の気流とボールの力で吹き飛ばしているのであるが、これがうまくいけばおからは分散され表面積が広がるのでただちに乾燥されると考えられる。チャンバ内では流れに沿っておからが運ばれるため、チャンバ右側壁 ($x=50$) に沿って上昇するとともに温度が低下し、大半のガスは排気口から流出する。チャンバ左側壁下部 ($x=-350$) において 82°C となり温度が最も低くなっている。これは水分が多く重いおからが左側壁に沿って下降し集まってくるためであると思われる。またドラムに続く上昇通路部で水平方向に温度が一様でなく、右側壁 ($x=50$) に近づくほど温度が高くなっている。ドラム内の高温気流の周方向速度成分が大きく、その影響で右側壁では温度は高くなるが、左側壁 ($x=-150$) はその影響が少なくチャンバから戻ってくる湿ったおからの影響を受けて温度が低くなる。

3.3 乾燥装置内部の圧力分布

圧力を Fig. 3(b) に示す 8 カ所で測定した。サンプル点は少ないがこれを基に等高線を求めて得た圧力分布を Fig. 5 に示す。ドラム内においてはノズル出口付近は 200 Pa で最も低く、ドラム周辺部はこれに沿って流れる際に遠心力を受けるため圧力が高くなり、最大で 230 Pa となっている。ドラム出口からチャンバの右側壁に沿ってほぼ一様に圧力が減少した後、天井部へかけて圧力が回復している。チャンバ内では流れは右側壁では直線的に上昇するのに対して左側では循環流に

Fig. 5 Pressure distribution.

より流れが曲げられるために左側で高めの値を示している。チャンバ入口部では上昇流と下降流の混合が起きるため圧力損失が生じ大きな圧力降下が生じていると考えられる。また乾燥ドラム出口の速度を、空運転において熱線風速計により測定した。ドラム出口上昇口の中央の断面上に 6 点設置したが、平均速度はおよそ 7 m/s であった。次節で述べる高温ガスのガス量から同位置での風速を求めてみると 6.8 m/s となり、よく一致していることがわかる。この気流により被乾燥物は分級チャンバに運び込まれる。おからを投入している状態ではおからの粉末の軌跡から流れの様子が観察できる。乾燥ドラム内では Fig. 4 において、入口ノズルから高速気流がドラムの周に沿って吹き込んでいるので、これにひきずられてドラム内に右回りの旋回流ができています。上部のチャンバ内では、右側壁に沿って上昇する流れと左側壁に沿って下降する流れがあり、これによって左回りの旋回流ができています。乾燥ドラム内のボールは高速気流によって高速で移動し、大半はドラム内で旋回するが、一部は上部のチャンバに達するものもある。

4. 乾燥装置の熱的評価

乾燥器の運転時の状態が合理的であるかを調べるために、水蒸気の質量バランスとエネルギーバランスについて検討する。

4.1 乾燥器内の水蒸気の質量バランス

水蒸気には、空気中に含まれている水蒸気、燃料中の水素が燃えて発生する水蒸気、おからに含まれている水分が蒸発して発生する水蒸気の 3 つが考えられる。供給空気はバーナ部で燃焼に利用する一次空気と下流で供給する大量の二次空気がある。一次空気の空気過剰率は 1.3 である。二次空気量は取り入れ口を計測ノズルとして測定してある。乾燥器の運転時の状態は Table 1 によりわかる。おからの供給量 50 kg/h とおからの含水率の値より、固形分と水分の流量が求まる。また燃料のプロパンガスの供給量は $1.176\text{ m}_\text{N}^3/\text{h}$ 、燃焼用一次空気および後流部で加えた二次空気量の測定値はそれぞれ $37.35\text{ m}_\text{N}^3/\text{h}$ 、 $260\text{ m}_\text{N}^3/\text{h}$ であった。 m_N^3 は標準状態における体積である。また燃焼に関する計算を容易にするために、燃料ガス $1\text{ m}_\text{N}^3/\text{h}$ あたりについての計算を行うことにする。空気の入口状態は 100 kPa 、 30°C 、相対湿度 60% なので入口空気の絶対モル湿度 x は 0.0260 である。燃料ガスは C_3H_8 として燃焼ガス量、発生水蒸気量を求めた。燃焼は

と表せるのでプロパン 1 m_N^3 の燃焼の際、 5 m_N^3 の酸素

を消費し 7 m_N^3 の燃焼ガスを発生する。空気で燃やす場合に発生するガス量 $v_1 \text{ m}_N^3$ は次式で表せる [10]。

$$L_0 = 5 / 0.21 \quad (2)$$

$$v_1 = \{(1+x) \mu - 0.21\} L_0 + 7 \quad (3)$$

ここで $L_0 \text{ m}_N^3$ は理論空気量（乾き空気量）、 μ は空気過剰率、 x は空気の絶対モル湿度である。燃焼ガス $v_1 \text{ m}_N^3$ 中の水蒸気量 $v_{1 \text{ H}_2\text{O}} \text{ m}_N^3$ は空気中の水蒸気と燃焼により発生する 4 m_N^3 を加えたものなので、

$$v_{1 \text{ H}_2\text{O}} = x \mu L_0 + 4 \quad (4)$$

となる。また燃焼ガス中の、乾きガス量は

$$v_{\text{dry}} = v_1 - v_{1 \text{ H}_2\text{O}} \quad (5)$$

である。Table 2 はおからの供給速度、燃料流量、空気流量をまとめたものであるが、右の欄に燃料 $1 \text{ m}_N^3/\text{h}$ に対応する値を示してある。Table 2 において全空気は一次空気と二次空気を合わせたもので、全乾き空気と理論空気の比 μ を求めると 10.35 となる。また燃焼ガス中の乾きガス量 v_{dry} は乾燥器出口でも同じ量で、水蒸気量は、乾燥室内で発生する水蒸気のみだけ増加して乾燥器を出てゆく。

運転状態での水蒸気の質量バランスを m_N^3 で考える。おからの供給速度を $M_1 \text{ kg/h}$ 、乾燥おからの回収速度を $M_2 \text{ kg/h}$ 、燃料流量を $F \text{ m}_N^3/\text{h}$ 、出口ガスの絶対モル湿度を x_2 とすると質量バランスの式は以下のようになる。

$$F v_{1 \text{ H}_2\text{O}} + (M_1 - M_2) \times \frac{22.4}{18} = F v_{\text{dry}} x_2 \quad (6)$$

左辺は、燃焼ガス中の水蒸気とおからから発生する水蒸気である。これらが煙道から排出されるので、右辺の出口ガス中に含まれる水蒸気と等しくなるはずである。入口空気、乾燥ドラム入口、乾燥器出口における全ガス量、乾きガス量、水蒸気量の値を Table 3 にまとめている。燃料流量 F を $1 \text{ m}_N^3/\text{h}$ とした場合の値も併

Table 2 Flow rates of wet material and air.

Wet material	50 kg/h		42.52 kg/h	
	solid	water	solid	water
inlet	11	39	9.354	33.166
outlet	11	0.96	9.354	0.816
Fuel	$1.176 \text{ m}_N^3/\text{h}$		$1 \text{ m}_N^3/\text{h}$	
Air	wet m_N^3/h	dry m_N^3/h	wet m_N^3/h	dry m_N^3/h
Theory		28.00		23.81
primary	37.35	36.40	31.76	30.95
secondary	260.0	253.4	221.1	215.5
total	297.3	289.8	252.8	246.4

Table 3 Gas flow rates.

Feed rate	50 kg/h			42.52 kg/h		
Fuel	$1.176 \text{ m}_N^3/\text{h}$			$1 \text{ m}_N^3/\text{h}$		
Gas	wet m_N^3/h	dry m_N^3/h	water vapor m_N^3/h	wet m_N^3/h	dry m_N^3/h	water vapor m_N^3/h
air	297.3	289.8	7.535	252.8	246.4	6.41
inlet	299.7	287.5	12.24	254.8	244.4	10.41
exit	347.0	287.5	59.58	295.1	244.4	50.67

記してある。おからは 78% の水分割合から 8% の水分割合に減少するのでこれに伴って燃料 $1 \text{ m}_N^3/\text{h}$ について 32.35 kg/h の水分が蒸発する。体積で $40.26 \text{ m}_N^3/\text{h}$ である。これを合わせたものが出口ガスとなる。また、式 (6) より、乾燥器出口の絶対モル湿度 x は 0.208 と求まる。出口状態は実測の結果 79°C 、 100 kPa であったのでこれらより出口相対湿度は 37.8% と求まる。出口における相対湿度の実測値は 32~34% である。一方湿度計の精度は表示値 $\pm 2.1\%$ 湿度であり校正の不確かさが $\pm 1.0\%$ 湿度あるとされており、全体で $\pm 3.1\%$ の湿度の測定誤差が見込まれる。従っておおよそ誤差の範囲で一致しており、水蒸気の流れについては無理がなく説明できると考えて良い。

4.2 乾燥器内のエネルギーバランス

運転状態におけるエネルギーバランスについて検討する。入口空気温度を基準温度とすると、エネルギーバランスは以下のようになる。

$$F q_f + W = F v_{\text{dry}} c (t_2 - t_{\text{air}}) + F v_{1 \text{ H}_2\text{O}} c_w (t_2 - t_{\text{air}}) + (M_1 - M_2) h_v + M_2 c_s (t_2 - t_{\text{air}}) + Q \quad (7)$$

入口空気温度を t_{air} 、出口ガス温度を t_2 とする。 $q_f \text{ kJ}/\text{m}_N^3$ は燃料の低位発熱量、 $W \text{ kJ/h}$ は送風機動力、 $c \text{ kJ}/\text{m}_N^3\text{K}$ は乾きガスの比熱、 $c_w \text{ kJ}/\text{m}_N^3\text{K}$ は水蒸気比熱、 $h_v \text{ kJ/kg}$ は水蒸気のエンタルピー、 $c_s \text{ kJ/kgK}$ は乾燥後のおからの比熱、 $Q \text{ kJ/h}$ は放熱量である。左辺は燃料の発熱量と送風機動力である。右辺は乾き燃焼ガスのエンタルピー、燃焼ガス中のおからからの発生分は除いた水蒸気のエンタルピー、おからより発生した水蒸気のエンタルピー、出口のおからのエンタルピー、乾燥器からの放熱量の和である。熱風の乾きガスのエンタルピーを求めるためにはその比熱の値が必要である。熱風の乾きガスのモル分率と比熱および水蒸気の比熱を Table 4 に示す。プロパンの低位発熱量は 2044 MJ/kmol なのでバーナ部での供給熱量は 107 MJ/h である。また送風機での供給エネルギーは 5 kW (18 MJ/h) である。これらがすべて供給空気の加熱に使われるとすれば合計 125 MJ/h のエネルギーが加えられることになる。一方、乾燥室入口温度は 350°C に制御されている。ガスのもつ熱

Table 4 Gas composition and specific heat.

Gas	Specific heat kJ/m _N ³ K
dry gas (N ₂ :O ₂ :CO ₂ =0.7957:0.1933:0.0109)	$c=1.304$
water vapor	$c_w=1.495$

量は 125.5 MJ/h となり加熱量とほぼ一致している。乾燥室でおからは含まれている水分が 38.04 kg/h だけ蒸発する。おから中の水分が、乾燥器を出るときにもっているエネルギーは乾燥前の湿ったおからの 30℃を基準として、水 1 kg あたりに

$$h_v = 1.86 \times (79 - 30) + 2500 = 2591 \text{ kJ/kg} \quad (8)$$

なので、全体では 98.6 MJ/h となる。乾燥後のおからの保有エネルギーはその比熱を 2 kJ/kgK として 1.08 MJ/h である。燃焼ガスに由来する残りのガスがもつ熱は 19.4 MJ/h である。乾燥ドラムでは入口温度は 350℃であり、ここで熱風がもっていた熱から、上で求めた出口で持つ熱を差し引くと 6 MJ/h が周囲に放熱されていることになる。エネルギーの流れを Fig. 6 にまとめて示す。

エネルギーの流れは以上のようになっていると考えられる。燃料ガスの発生熱と送風機の消費動力の合計に対するおからの乾燥に使われた熱量の割合を効率とすれば効率は 79.7% となっている。この値は一般的な乾燥装置の値に比べて高い値を示している。

以上のように水蒸気のバランスから見ても、エネルギーのバランスから見ても矛盾がなく、実験結果は妥当な値が得られていると考えられる。

5. 結 言

提案した新型乾燥器を用いておからの乾燥実験を行い、乾燥器内の熱流動について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 本乾燥器では乾燥ドラム内でセラミックボールと高速の気流によって被乾燥物を粉碎、分散して、被乾燥物を焦がすことなく連続的に乾燥できている。

(2) ドラム内とチャンバ内には、それぞれ互いに逆向きの旋回流が生じており、被乾燥物は気流に沿ってなめらかに運ばれている。

(3) 乾燥のほとんどはドラム内で行われており、チャンバに入った被乾燥物のうち、水分が多くて重い被乾燥物はドラムに戻り、水分を含むが比較的軽いものは流れに沿ってチャンバ内に運ばれ気流乾燥を受けている。

(4) 乾燥器内の水蒸気の質量バランスから求められる出口の湿度は、実験結果の出口湿度と一致しており、乾燥装置内での水蒸気発生メカニズムが確認できた。

(5) 乾燥器内の熱量バランスから乾燥における熱効率は 80% 程度となることが確認できた。

(6) 今回開発した乾燥器は比較的小容量であり産業用に使用するためには大容量化が必要で、そのためにはドラムおよびチャンバ内の流れについてさらに詳しく検討することが必要である。

Nomenclature

- c : heat capacity of dry combustion gas, kJ/m_N³K
- c_w : heat capacity of water vapor, kJ/m_N³K
- c_s : heat capacity of dried product, kJ/m_N³K
- F : flow rate of fuel gas, m_N³/h
- h_v : enthalpy of water vapor, kJ/kg
- L_0 : volume of theoretical air for 1 m_N³ fuel gas, m_N³
- M : feed rate of wet material, kg/h
- q_f : lower heating value of fuel, kJ/m_N³
- Q : heat loss, kJ/h
- t : temperature, °C
- v : combustion gas volume for 1 m_N³ fuel gas, m_N³
- v_{dry} : dry combustion gas volume for 1 m_N³ fuel gas, m_N³
- $v_{\text{H}_2\text{O}}$: water vapor volume in combustion gas for 1 m_N³

Fig. 6 Energy flow in the dryer.

fuel gas, m_N^3

W : power input to the blower, kJ/h

x : absolute molar humidity of air, -

μ : excessive air ratio, -

Subscript

air : surrounding air

1 : at inlet of the drying drum

2 : at exit of the dryer

引用文献

- [1] Trend of development of drying equipments -Special report on new technologies of food drying (in Japanese), Shokuhin to Kaihatsu, **37**(12), 14-17 (2002).
- [2] A. Kubota; "Drying equipments, 2nd edition (Kansou Souchi)", The Energy Conservation Center, Tokyo, Japan, 2004.
- [3] R. Kirie; "Drying, 4th edition (Kansou)", Kagaku Kogyo Sya, Tokyo, Japan, 2002.
- [4] Introduction of heating and drying equipments developed by several makers-Special report on heating and drying technologies of food (in Japanese), Japan Food Science, **42**(3), 38-42 (2003).
- [5] H. Takashima; Drying equipments for adhesive materials using swirling air flow(in Japanese), Kagaku Souchi, **45**(9), 55-60 (2003).
- [6] T. Ishihara, M. Yokosuka, T. Arai, New concept dryer with preforming process (in Japanese), Kagaku Souchi, **43**(6), 122-126 (2001).

[7] K. Wakiya, Drying equipments (in Japanese), Kagaku Souchi, **40**(4), 91-94, (1998).

[8] K. Tabata, Liquefied materials dryer with preforming and fluidization (in Japanese), Powder Science and Engineering, **36**(2), 43-50 (2004).

[9] "JIS8330 , Testing methods for turbo fans (Sofuki Shikenho)", Japanese Standards Association, Tokyo, Japan, p.8, 1962.

[10] M. Numano, T. Nakajima, N. Kamo, "Steam engineering (in Japanese)", Asakura Syoten, Tokyo, Japan, p.42, 1987.

[11] J. C. Davis; "Statistics and data analysis in geology", John Wiley & Sons, p.383, 1986.

要 旨

豆腐の製造過程で発生するおからは産業廃棄物扱いとなり、その処理法の1つとして乾燥して再利用しようという考えがある。そこで、乾燥ドラムと分級チャンバ、サイクロン分離器よりなる新しい乾燥器を考案した。ドラムには直径5 mmのセラミックボールが入れてあり、おからはこれにより粉碎され熱風により流動化している。おからを投入した運転状態で供給燃料流量、空気流量、温度分布、湿度などの測定を行った。ガスの温度降下から乾燥の大半はドラム内で行われている。乾燥器内の水蒸気の質量バランスから求められる装置出口の湿度は、測定した出口湿度と良く一致しており、運転状態が合理的である事を示している。また乾燥器内の熱量バランスから乾燥装置の熱効率は80%程度となる。今回開発した装置により焦げを発生することなく連続的に効率よく乾燥できる事がわかったが、比較的小容量なので大容量化する必要がある。