◇◇◇◇ 原著論文 ◇◇◇◇

新型乾燥装置の内部流動について

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

Internal Flow 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*

The flow conditions of a new dryer for by-product of tofu proposed in the previous paper are examined. Its drying capacity is relatively small and to know the internal flow is necessary to develop larger capacity machines. Firstly, the interior of drying drum and classifying chamber were observed using high speed video. Wet materials returning from upper chamber are colliding with the materials and ceramic balls moving along the surface of the drying drum entrained in the hot air and dispersed. In the classifying chamber counterclockwise circulating flows are formed. Then numerical simulation was carried out for the flow of this dryer using FLUENT. Necessary nodes were about 800,000 to describe the whole machine. Obtained path lines are almost consistent with the video images showing the validity of the simulation method. To get the suitable geometry for 5 times larger machine, flow conditions were compared for three types of geometry of the entrance to classifying chamber and the best geometry was determined. The chamber height was then determined so that the velocities at the ceiling are below 3 m/s to avoid adhesion of the wet materials to the wall. Based on the obtained results 300 kg/h machine was build and it was successfully operated.

Keywords: Waste Disposal, Drying Drum, Ceramics Ball, Internal Flow, Numerical Simulation

1. 緒 言

豆腐の製造時にはおから [1,2] が副産物として発生し、この処理が問題となっている。単に焼却するのではなく、これを乾燥し、得られる粉末を食材として利用する事が考えられている。しかし、乾燥させようとすると焦げ付きが生じてしまうなどの問題があり、適用できる乾燥器がなかった [3,5]。これらを解決する方法として、セラミックボールを封入した乾燥室をもつ、新しいおからの乾燥器を開発し、前報ではその性能についての検討をした [6]。現在の処理能力は比較的小さいので、産業用として利用するためには大容量化する必要がある。そのためには、内部の流動状況について十分に把握する必要がある。そこで現行の乾燥器の内部の流動の観察をするとともに、計算機を用いた数値

シミュレーションにより流れを求めて、これと比較検討した。さらに、乾燥器の処理量を増やすために大型化する目的で、寸法を大きくした際の流れの様子を調べることによって、最適な形状寸法を求めるための考察を行った。

2. 乾燥器内の流れ

2.1 内部の観察

前報で述べた 50 kg/h の処理能力をもつ乾燥器におからを実際に投入して乾燥作業をしている状態での流れの様子を把握するために観察を行った。乾燥ドラムと分級チャンバーの側壁に耐熱ガラス製の窓を作り、内部を見えるようにした。全負荷での運転状態を Fig. 1 に示す。左が乾燥ドラムで右が分級チャンバーである。ドラム内全体におからが充満し旋回しているのがわかる。またチャンバー内では上ほど薄く乾燥が進んでいること、右側壁をおからが上昇し左上方に乾燥した粉末が流出していることがわかる。しかしながら、おか

(受付 2008 年 5 月 24 日, 受理 2008 年 11 月 7 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字花面 230-1

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

らに遮られて内部の詳細はほとんどわからない。そこでおからの投入量を減らして、高速ビデオカメラで内部の観察をした。撮影速度は 250 frame/sec である。Fig. 2 はその一部を示したもので、時間経過の順に番号をつけてある。のぞき窓の径は 230 mm でドラム径 400 mm に比べて小さく、ドラムの周辺部は見えていない。また、右上部に投入口、右下に熱風の吹き出し口があるがこれらも視野外となっている。熱風はちょうどこの窓の取付フランジの陰になっている部分より外側を流れており、内部には画面全体に右回りの旋回流が形成されている。画面右下部に窓フランジに沿って白い部分が移動しているが、これは投入されたおからであり、熱風により運ばれている。また画面左側においては、

Fig. 1 Pictures of operating conditions.

Fig. 2 High speed images of the flow in the drum.

おからが流れ落ちているが、これは上部チャンバーより戻ってくるおからである。熱風の速度は、窓に接した部分では窓の影響で減速される。乾燥の終わっていないおからは比較的重いいため、この速度の遅い窓際部に集まるように落下してくる。このドラム壁に沿って落ちてくるおからに、右から来る熱風が画面の左下で当たって上方に巻き上げられている。1でも吹き上げているが、3, 4でよりはっきりとわかる。熱風によって運ばれているおからと落ちてくるおからが衝突して、5と6では画面全体に大きく吹き上げられている。また、落ちてくるおからと巻き上げられたおからが当たって向きが変わりつつある。これらには写っていないが、ボールも巻き上げられており、ボールが含まれているためより強く粉碎されていると考えられる。白く写っている部分はまだ比較的大きくドラム内に残り旋回するが、大半は粉末に近い状態になって高速流れの乗って上のチャンバーに運ばれている。おおよそこのような状態が繰り返されているものと考えられる。

2.2 数値シミュレーション

観察した流れと比較するために、市販の汎用熱流体解析ソフト FLUENT 6.2 を用いて流れのシミュレーションを行った。計算領域は Fig. 3 に示すように乾燥ドラム入口から分級チャンバーを経てサイクロン出口までの全領域である。計算格子は全領域において非構造四面体格子を用いており、格子数は約 80 万である。乱流モデルとして標準 $k-\epsilon$ モデルを使用している。この中で用いられているパラメーターの値を Table 1 に示

Fig. 3 Calculation area.

Table 1 Parameters used in the $k-\epsilon$ model.

C_μ	σ_k	σ_ϵ	$\sigma_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92

す。境界条件のうち、乾燥ドラムへの熱風の入口速度は 10 m/s とした。乾燥を終えた気体はサイクロン分離器の上部と下部より流出するので、ここでの圧力は大気圧となる。したがって、サイクロン出口の圧力を 0 Pa と指定した。おからの投入口は計算領域には加えていない。またおからなどの被乾燥物、セラミックボールも加えていない。また熱風は近似的に空気として計算した。シミュレーションによって得られた結果を Fig. 4 に示す。乾燥器を z 軸方向の手前から見た場合の立体図として表示してある。Fig. 4(a) は奥行き方向 (z 軸方向) の中央位置の垂直断面上の速度ベクトルである。ベクトルの長さは入口速度を基準としてこれに比例して描いてある。また、Fig. 4(b) は同じ垂直断面内に質量のない粒子を配置し、流れに乗って移動させた軌跡をたどった流跡線である。

まず乾燥ドラム内の流れを見てみる。ドラムへの入口部はノズルになっており、このノズルで絞られて最大流速は 95 m/s になっている。この噴流がドラムに対して接線方向に流入し、外壁に沿って時計回りに流れ、上昇口を通して上方に流出する。この流れによってドラム内部には旋回流が生じている。これは Fig. 1 ないしは Fig. 2 の写真によってもわかる。Fig. 4(b) の流跡線を見ると、この旋回流部とドラムの壁との間は狭く、高速気流はこの狭い部分に集中して流れていることがわかる。Fig. 2 においても窓から上端が一部見える程度でこの気流部は狭くなっていると考えられる。右上のじゃま板の右側には逆回りの旋回流が生じている。このじゃま板の位置により旋回流の位置が変わる。実機

では、このじゃま板の右側の部分に被乾燥物を送り込むロータリーフィーダーの開口部があり、おからが投入されている。

気流はドラムを出ると、チャンバー右側の壁に沿って上昇する流れとなる。Fig. 4(a) のベクトル図によると、チャンバー内の気流の速度はドラム内よりかなり遅い。ドラム出口では高速で 20 m/s 程度である。気流はチャンバーの右側壁に沿って減速しながら垂直上向きに流れ、チャンバー上部では 3 m/s 以下にまで減速されている。Fig. 4(b) の流跡線よりチャンバー内の流れを見ると、右側壁に沿った速い流れと左回りの大きな旋回流ができていることがわかる。流れは奥行き方向に一樣でなく、ドラムを出た速度の速い粒子は壁際を上昇するが、一部は広がりながら上昇する。右下から斜めに左上の出口に至る流跡線がそれである。上部に達した流れは一部は出口から流出し、残りは下降して左回りの大きな旋回流になる。また、上部では x 軸方向の軸まわりに旋回をしながら出口方向に向かって流れており、図の上部にらせん状の流跡線が見えている。これをたどると流出するものと、下降するものとがある。下降したものは下部で噴流の影響で再び上昇して比較的小さな左回りの旋回流を形成している。下部の旋回流の上に小さな外から中へと巻き込む旋回流ができていることになる。

チャンバー内の垂直断面内の流れを見るために、横からスリット光を入れて高速ビデオ撮影した。Fig. 5 はその 1 コマである。明らかに、チャンバーの右側壁近傍の上向きの流速が非常に速く、左側壁近傍の下降流も速いが、チャンバー中央部の流速は遅く、チャンバー内では反時計回りの旋回流が生じている様子がわかる。被乾燥物の動きは、数値シミュレーション結果の流跡線に良く一致しており、被乾燥物が気流によって運ばれる様子が捉えられている。

チャンバー入口の Fig. 6 に示した位置に熱線風速計を設置して風速の測定を行った。この速度は y 方向の速度成分となる。得られた速度分布と同位置での数値

Fig. 4 Internal flow of 50 kg/h dryer.

Fig. 5 Flow in chamber.

Fig. 6 Positions of velocity measurement.

Fig. 7 Velocity in y direction.

シミュレーションによる速度分布を比較したのが Fig. 7 である。速度が最大となる位置は右側壁より約 1/3 の位置であり、分布形状、値ともよく一致していることがわかる。またシミュレーションでは左壁より 1/4 の部分では速度が負になっておりチャンバーからドラムへの逆流が生じていることがわかる。実測結果では実験装置の都合上、この逆流している領域の測定データは得られなかったが、それ以外では実験値と計算値はほぼ一致している。この部分は乾燥しきれなかった重い被乾燥物がチャンバー壁に堆積せずに、乾燥ドラムに戻ることで乾燥作業においては有益であると考えられる。このようにドラム内およびチャンバー内において流れのよどみ領域はなく流れはスムーズであり、被乾燥物が滞留するところはないと考えられる。

ところでおからやセラミックボールなどを加えて計算はしているわけではない。しかし燃焼ガス流量に比べておからなどの添加量が少ないためこれらを無視しても比較的近い結果が得られたものと考えられる。

3. 大型機の開発

前報で提案した装置を用いて実際に運転してみると

50 kg/h の処理量では良好に運転が可能であった。しかし、産業用に使うためには、処理量をさらに 5~10 倍程度にまで増大する必要がある。最も簡単に大型化するには、側面から見た形状は変更せずその厚さだけを厚くすることが考えられるが、この方法では装置が大きくなってしまい。これとは異なった大型化について考えることにする。そこで現行機の 5 倍の処理量をもつ場合についての検討をシミュレーションにより行う。基本的な寸法として、乾燥ドラムの直径については、現状機 (Fig. 1) の 50 kg/h タイプでは 400 mm であったが、これを 500 mm とする。また上部のチャンバーについては、水平断面の寸法を 1000 mm × 1000 mm、高さは 3340 mm とする。熱風入口部の断面積は現行機の約 4 倍とした。乾燥量が 5 倍なので熱風量は 5 倍必要になる。そこで、熱風の入口速度を 13 m/s として計算する。チャンバー入口の位置と寸法は、チャンバー内の流れに大きな影響を及ぼす。そこで、Fig. 8 に示すような 3 種類のチャンバー入口形状について考える。ドラム中心を通る直線に対して左側に 188 mm 右側に 62 mm とする場合を A タイプ、188 mm と 100 mm する場合を B タイプ、200 mm と 100 mm する場合を C タイプとする。入口部の幅は A タイプは 250 mm、B タイプは 288 mm、C タイプは 300 mm の順に広げている。これらの奥行きは全て 500 mm とする。これらについて流れの様子を比較する。奥行き方向の中央位置での垂直断面の速度ベクトル分布を Fig. 9 に、流跡線を Fig. 10 に示す。Fig. 9 の入口外部に入口速度ベクトルを基準ベクトルとして付加してある。ドラム内においてはドラム内壁に沿って流れた後、A タイプ、B タイプではチャンバー右側壁に向かうが、C タイプではチャンバー左側壁に沿って流出しており、全く流れが異なっている。またドラム内の旋回流は A と B はほぼ同じであるが、C は大きくチャンバー外に伸びている。白抜き矢印で示したドラム出口部の流跡線を見ると、ここでの速度は A が最も速いためチャンバーからの逆流が A ではほとんど起きていない。これに対して C では右側に逆流がありその先端がドラム内部にまで達している。B では左半分に逆流部があり、通路部の内部にまで及んでいる。

Fig. 8 Variation of chamber inlet dimensions.

Fig. 9 Comparison of velocity vectors.

Fig. 10 Comparison of path lines.

チャンバー内の流れは、Aタイプ、Bタイプともにチャンバー入口で流速 20 m/s～30 m/s で流入しチャンバーの右側壁に沿って減速し垂直上向きに流れ、天井上部に取り付けてあるじゃま板にあたり、一部はこれを持ち越えてサイクロン部に向かう流れとなるが、残りは下方に向かいチャンバー左側壁に沿って下降して流れ、反時計回りの旋回流が形成される。Cタイプでは流れが左側壁に沿って流れ、そのまま出口へ向かう流れと右側壁に沿って下降する流れに分かれ、チャンバー下部で時計回りの循環流が形成される。50 kg/h 機の流跡

線と比較してみるとAタイプとBタイプはほぼこれと近い流れになっているが、Cタイプは明らかにこれとは異なっている。また、Aタイプでは旋回流の奥行き方向の変化が小さい。そのため旋回流の上部域の流れも2次元적であり、速度も遅くなっており、よどんでいるように見える。Bタイプでは旋回流が奥行き方向に変化しているため、旋回流の上部の流れが2次元的でなくx軸方向の軸回りに旋回する流れが生じており、50 kg/h 機の流跡線に最も似ている。また大きな循環流の中心がAタイプの方がBタイプより下方にあり、循環流の大きさが小さくスペースがむだになっている。Bタイプの方がより好ましい循環流が形成されていることがわかる。しかし、Bタイプにおいては、チャンバー天井付近の速度が大きく、被乾燥物の付着が考えられる。

そこで、Bタイプのチャンバーにおいてその平行部を500 mm長くして全体の高さを高くすることを考えた。これをDタイプとする。Dタイプの速度ベクトルをFig. 11(a)に、流跡線をFig. 11(b)に示す。ドラム内の速度ベクトルを比較してみると、DタイプではBタイプに比べて天井近くでのベクトルの長さが短くなっていることがわかる。Bタイプでは約6 m/s程度の速度をもつが、Dタイプでは3 m/s以下になっている。経験的に、3 m/sであればおからは壁に付着しない。流跡線を見てみるとDタイプにおいては、その旋回流の中心はBタイプよりもさらに上方に移動しており、またBタイプよりもさらに大きな旋回流が形成されて

(a) Velocity vectors

(b) Path lines

Fig. 11 Internal flow of D type.

いる。この旋回流は奥行き方向に一様でなく、これらの上の流れも3次元的な流れという特徴もみられる。このように、Dタイプではチャンバー右側壁上部を沿う流速は3 m/s以下まで減速され、しかも大きな循環流が形成されているので、50 kg/h機と同じような乾燥に適した流れとなっていると考えられる。

これらに基づいて試作された乾燥器を用いて実際に運転してみると、およそ300 kg/h程度まで運転可能であり、得られる乾燥おからの状態も良好であることがわかった。

4. 結 言

新しい乾燥器の大容量化をするための指針を得るために、流れの観察と解析を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 処理量50 kg/hの現行機の乾燥ドラム内には、ドラムの内壁に沿って高速気流部があり、その内側に右回りの循環流が形成されている。またじゃま板を挟んで反対側には左回りの循環流ができています。
- (2) 同じく分級チャンバー内には左回りの大きな循環流が形成されている。
- (3) 現行機の流動についての数値シミュレーション結果は、実際の乾燥物の画像や流速分布の測定値と良く対応しており、シミュレーションは有効である。
- (4) 乾燥ドラムを5/4倍にして、処理量を5倍とするためには、チャンバー入口を比較した3種類の内Bタイプとし、さらにチャンバー高さを500 mm高くすると良いことがわかった。

引 用 文 献

- [1] “Tables of ingredients of foods (Syokuhin Seibun Hyou)”, Kagawa Nutrition University ed., Kagawa Nutrition University Publishing Division, Japan, 2003, pp.

118-119.

- [2] “Handbook of food engineering (Syokuhin Kougaku Hando Bukku)”, Japan Society for Food Engineering ed., Asakura Syoten, Tokyo, Japan, 2006, pp.452-455.
- [3] A. Kubota; “Drying equipments, 2nd edition (Kansou Souchi)”, The Energy Conservation Center, Japan, 2004.
- [4] R. Kirie; “Drying, 4th edition (Kansou)”, Kagaku Kogyo Sya, Tokyo, Japan, 2002.
- [5] M. Nakamura, Y. Tatemoto; “Studying drying technology from the basics (Kiso Kara Manabu Kansou Gijyutsu)”, Kogyo Chosakai, Tokyo, Japan, 2005.
- [6] M. Kiyota, J. Fukutomi, T. Nishi, N. Terashima, Drying performance of a new type drying equipment (in Japanese), Japan J. Food. Eng., **9**, 303-309 (2008).

要 旨

前報で提案した50 kg/hの処理能力をもつ乾燥器の内部の流れの観測と解析をまず行った。高速度ビデオにより、乾燥ドラム内でのおからの分散状況や、分級チャンバー内の左回りの大きな旋回流が観測できた。解析により、ドラム内には内壁に沿って高速気流部があり、その内側に右回りの循環流が形成され、じゃま板の反対側には左回りの循環流があること、また、チャンバー内には左回りの大きな循環流があることが確認できた。解析結果は、実際の内部流れの画像や流速分布の測定値と良く対応しており、本解析は有効であることがわかる。そこでこれを用いて、乾燥ドラムを5/4倍にして、処理量を5倍とするためには、チャンバー入口を比較した3種類の内Bタイプとし、さらにチャンバー高さを500 mm高くするとよいことがわかった。得られた結果に基づいて試作した乾燥器により、およそ300 kg/h程度まで良好におからを乾燥できることがわかった。