

注目 しています。その技術!

高機能食品乾燥機の研究開発と製品化およびその特徴

木原康博, 木原利昌, 木原功一郎

株式会社 木原製作所

1. 緒 言

伝統的に農産物や海産物などは天日により乾燥製品化されてきたが、大気環境の悪化や衛生面の観点から天日乾燥が厳しい状況になってきている。食品加工業界において熱風乾燥機はイニシャルコストが比較的安価なため、対象物（乾燥物）の水分調整や新規に機械を設置する場合に検討されるなど、注目が高まっている。

今までの温風乾燥機は乾燥庫内環境（温度・湿度）・乾燥時間を設定制御し、乾燥を進めていくものであり、乾燥過程における対象物（製品）自体の変化（データ）を観測（モニタリング）できないブラックボックス化したものだった。そのため製品品質に適切な乾燥操作（乾燥プログラム）を設定するまでの時間・経費・材料損失が莫大となり、新規商品開発の足かせとなり、乾燥加工業界への新規参入者・起業者への参入壁が高くなってしまっている。また、現在、乾燥食品を製造しているユーザーも新規製品の製造条件や既存品の条件改良のために、迅速な条件設定方法の確立が必要となる。

本稿では、棚段食品乾燥機について説明し、乾燥時の食品のさまざまな情報のモニタリングが可能となる高機能棚段食品乾燥機の開発と、モニタリング情報と製品品質の関係について検討した事例を紹介する。

2. 独自技術による棚段乾燥機の開発と製品化

棚段回分式食品乾燥機は、図1に示すように構造的には単純であり、運転・保守管理が容易であることと、比較的安価であることにより、農産物から加工食品まで多様な製品の乾燥に使用されている。

しかしながら、外気を加熱した熱風を乾燥物と接触させ、蒸発した水分を含んだ空気をそのまま排気する一方送風式の乾燥機が大半を占めていた。この方法で

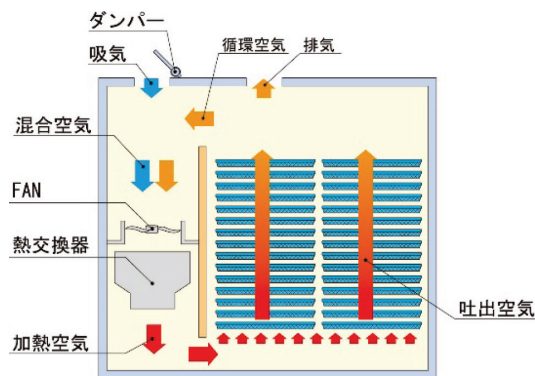


図1 棚段回分式乾燥機の構造



図2 湿球温度制御棚段乾燥機 木原製作所椎茸乾燥用 DDS 装置

は、乾燥空気温度、乾燥時間のみの管理となり、熱風をそのまま排出するため、使用する熱量（燃料費）が莫大なものとなっていた。

そこで、図2に示すように熱風を循環・再利用し、庫内の温度（乾球温度）、湿度（湿球温度）を管理・制御する乾燥機を開発した。湿球温度は乾燥庫内の湿度だけではなく、乾燥初期の定率（恒率）期間の乾燥物の品温を代用する温度として管理することにより、乾燥物の品温管理、急激な乾燥による乾燥物の表面硬化・変形を抑制することによる品質管理が可能となり、使用熱量（すなわちランニングコスト）の大幅な削減ができた。

〒754-1102 山口県山口市秋穂西 3106-1
† Fax: 083-984-2177, E-mail: info@kiharaworks.com

本乾燥装置（DDS[®] Dual Drying System 乾球・湿球温度自動制御）は多くのユーザーに利用されており、スケールとしては小型冷蔵庫サイズのものから、6坪（19.8 m²）もある葉たばこ乾燥機までとりそろえており、奥行 1,300×高さ 2,000 mm の機種は椎茸乾燥用の標準装置として広く利用されている。

3. 高機能棚段乾燥機の試作・製品化 および品質測定の検証

前述の棚段乾燥機に改良を加え、さまざまな食品乾燥用途に販売してきたが、現状は乾燥中における対象物（乾燥物）の状態を確認する方法は目視・触感といったもので、正確な乾燥データはなく作業者の経験・知識等に頼るものがほとんどだった。緒言でも述べたように既存の乾燥機はブラックボックスであり、例えば野菜の乾燥は 80℃以下で半日以上かかるので、試行錯誤による乾燥条件はたいへんな時間と労力を必要とする。

そこで、乾燥条件の迅速決定のため乾燥過程における対象物（乾燥品）自体の変化（データ）を観測（モニタリング）可能な機能を搭載した乾燥機を開発することとした。

従来の乾燥庫内の温度・湿度の測定に加え、以下の機能を搭載した。

- I 対象物の変化を連続撮影保存できるカメラ
- II 対象物（乾燥物）の品温を測定する熱電対

III 乾燥庫内環境を変えることなく、対象物を取り出すことのできるサンプルポート

I. カメラの画像情報と II 熱電対出力は連続的に PC に取り込まれる。III のサンプルポートは、主として品質のオフライン測定のためのサンプリング用であるが、測定過程において乾燥庫内の環境を変化させることなく乾燥物の取り出しが可能で、オフラインでの重量や色彩測定にも非常に便利である。

非接触センサーである放射温度計による品温測定を熱電対と比較して検証を進めている。また、電子天秤による乾燥中の対象物の重量測定も可能にした。放射温度計・天秤に関しては本機自体への装備はオプション仕様としている。

構造概略図と装置外観を図 3 に示す。プログラムコントローラー画面はピクトグラムを使用したユーザーフレンドリーな仕様とした（図 4）。図では 5 ステップの乾燥プログラムが表示されているが、1つのプログラムに 20 ステップまで設定可能であり、プログラムは 6 個まで記憶することが可能である。このようなプログラム機能を装備した乾燥機は少ない。

これら搭載した機能によりモニタリングした情報と乾燥品質との関係について調査し、食品品質を保持したまま乾燥時間を短縮する方法の開発に着手した。測定・検証は、地元の山口県産業技術センターと山口大学工学部と共同で進めた。乾燥試験を行う対象物としてはトマトジュース・トマト・にんじん・レモンの 3

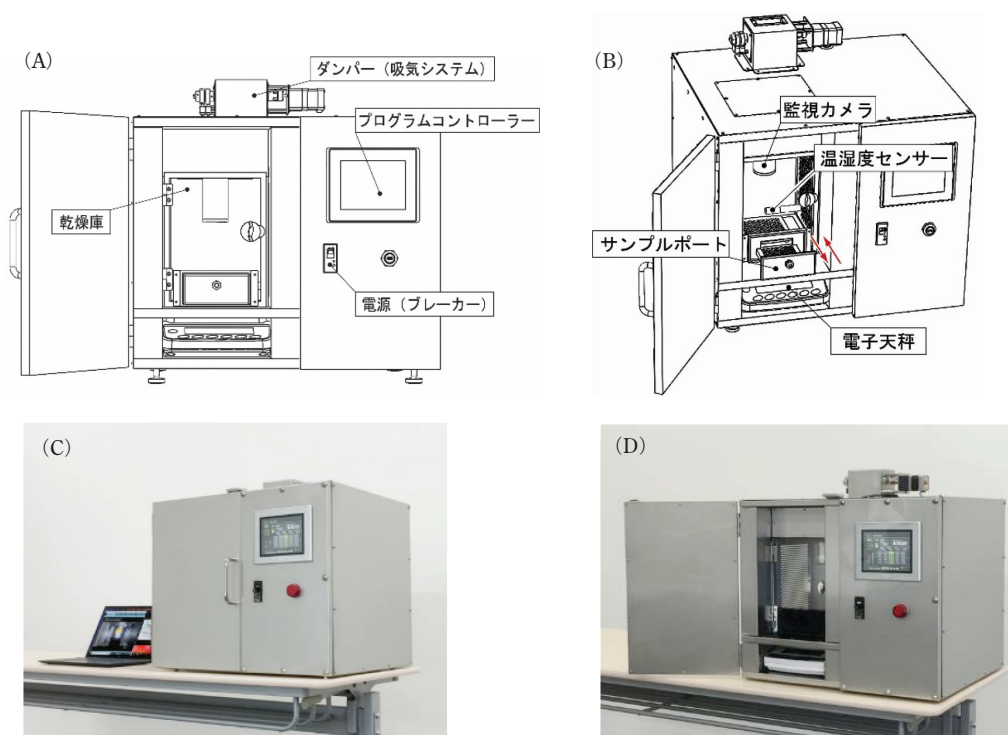


図 3 卓上式小型研究用乾燥装置 構造概略図 (A) (B) と装置外観 (C) (D)



スタートアップ画面



プログラム入力画面



運転中表示画面

図4 プログラムコントローラー画面

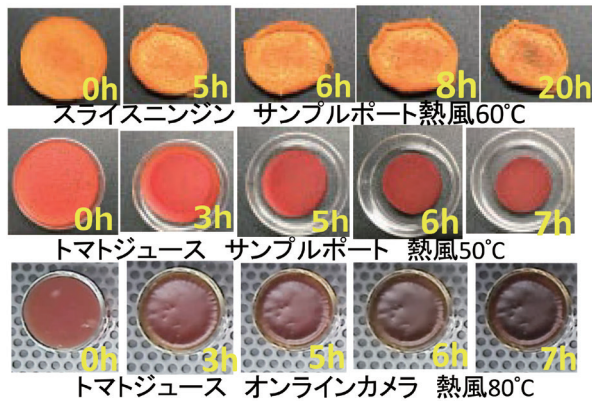


図5 乾燥時の試料のオフライン（サンプリング）あるいは連続撮影画像

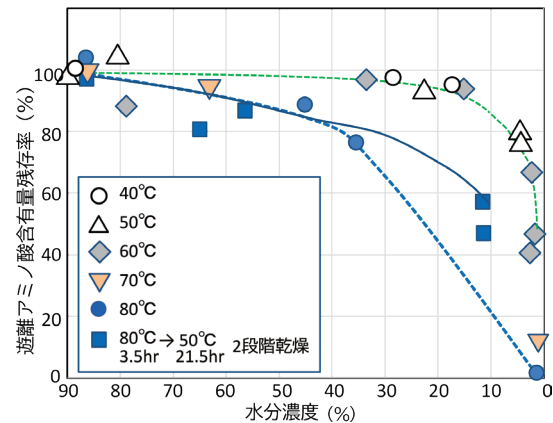


図6 水分含有量とグルタミン酸含有量残存率の関係に対する熱風温度の影響

種とした。これらのサンプルを研究用乾燥装置で試験乾燥し、水分濃度（含水率）や温度と品質を測定した。

図5は乾燥時の各種試料のサンプルポートからのカメラ撮影および連続画像撮影記録ファイルからのスナップショットである。庫内のオンライン撮影でも鮮明な画像情報が記録できている。

品質評価に関しては、最初に試験サンプルをトマトジュースとし、i)色調、ii)遊離アミノ酸濃度、iii)味覚、iv)香りについて山口県産業技術センターで分析した。感性に係る変化を捉えることができたが、最も変化の大きいii)遊離アミノ酸濃度を評価対象として分析を進めることとした。

図6に、さまざまな熱風温度での乾燥中にサンプルポートからサンプリングした試料（トマトジュース）の遊離アミノ酸（グルタミン酸）濃度（残存率）と、水分量に対する関係を示している。遊離アミノ酸濃度は熱風温度が高くなると減少するが、特に乾燥後期の材料温度が高くなる領域（水分濃度が低い領域）で顕著である。最初に高温80℃で3.5時間乾燥し、その後、温度を下げ（50℃）21.5時間乾燥する2段階乾燥では乾燥後期まで高い濃度が保持されており、乾燥時間は50℃一定のときより20%程度短縮された。また、遊離アミノ酸濃度が減少する領域では、著しい試料の褐変が観察された（図5のトマトジュース80℃の画像参照）。

ニンジンでも同様な傾向のデータが得られている。

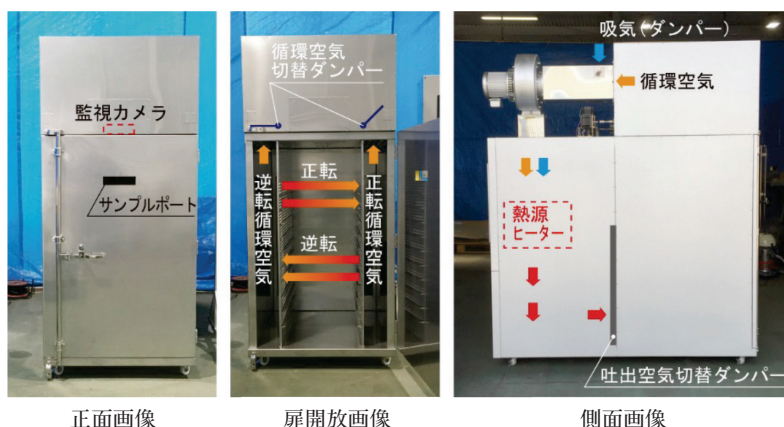
以上の結果より、品温が低い水分含有量40%程度までは、高温での乾燥、その後は熱風温度を下げて乾燥することにより、品質を保持しながら10-20%程度の乾燥時間短縮を図ることが可能と考えられる。

また、この乾燥手法は、色彩への影響からみても効果的と予想される。今後は、乾燥時の水分濃度・材料温度および品質と画像情報の間の定量的な相関についての検討が必要である。



規格：(W)1,200×(D)793×(H)1,550 mm
電源：3相200V
処理量：約16kg/回
トレイ：651×519mm 7枚

図7 小型乾燥機（小ロット生産用乾燥機）



正面画像

扉開放画像

側面画像

規格：(W)995×(D)1.943×(H)2.200 mm

電源：3相 200V

処理量：約 33 kg/回

トレイ：540×870 mm 10枚

- ・量産型食品乾燥機と量産型農林産物用乾燥機は同規格
- ・量産型食品用乾燥機は洗浄性を向上させるため、ステンレス製、内部全溶接でシール性UP
- ・量産型農林産物用乾燥機はコストパフォーマンス向上のため、ガルバニウム銅板製

図8 量産型乾燥機（食品用・農林産物用）

4. 製造用乾燥機への展開

上記の機能を他の製造用乾燥機（小ロット生産用乾燥機・量産型食品用乾燥機・量産型農林産物用乾燥機）への展開を図った（図7, 8）。全ての機械は棚段回分式乾燥機で、カメラ、熱電対、サンプルポートを搭載している。食品用と農林産物用は同型であるが、洗浄性およびコストパフォーマンスの観点で仕様異なる。

なお、庫内の乾燥ムラは棚段乾燥機の問題点であるが、これを抑制するため以下を検討中であり、確認次第、実装していく予定である。

- 吸気用ダンパーに加えて、吐出空気切替ダンパー2基と循環空気切替ダンパー2基を設置し、温風の吐出方向を正転・逆転する機構
- 整風板の開口率による吐出量調整

5. まとめと今後の展開

以上のように各種モニタリングデバイスを装備（搭載）した高性能熱風乾燥機を開発した。この装置により製造装置の最適乾燥条件の設定時間が大幅に短縮できると考えられる。また、乾燥時間の短縮も可能であり二酸化炭素削減にもつながる。熱風乾燥は熱効率が低く環境負荷が高い（二酸化炭素排出量が多い）ので、このような乾燥条件の最適化は、現在のカーボンニュートラルを目指す社会においてコスト削減と同時に重要である。

いくつかの食品産業関連の展示会にブース出展をし、ユーザーヒアリングを実施した。その結果、対象物の乾燥データが連続的に抽出できるデバイスを搭載した研究用乾燥装置への関心が高く、ニーズがあることが確認で

きた。特に、画像の連続撮影機能やサンプルポートは、今まで装備された装置がなかったので興味を引いたと思われる。本装置は、本年中の販売開始を予定している。

本装置を使用した乾燥条件の迅速決定は、基本的にはユーザーが実施する。しかしながら、多様な試料と条件に対する実験回数は膨大となるので、データベースを利用したモデルシミュレーションの併用が望まれており、装置メーカーとしてサポートできるように検討していきたい。

熱風乾燥機は熱効率が低いことが知られており、多くの二酸化炭素が排出されている。二酸化炭素削減のためには、上述した乾燥プログラムの最適化に加えて、再生エネルギーの利用が望まれる。今回、開発した熱風乾燥機の再生エネルギー併用型への転換を検討していきたい。

本研究開発に対して2021年度日本食品工学会産学官連携賞が授与された。具体的な乾燥温度変化プログラムやモデルシミュレーションについては、受賞論文 [1] に記載したので参照してほしい。

参考文献

- 1) 木原康博, 木原利昌, 木原功一朗, 有馬秀幸, 山本修一. 高品質な乾燥食品の生産を実現させる高機能乾燥機の研究開発と製品化. 日本食品工学会誌, 24, 11-18 (2023). <https://doi.org/10.11301/jsfe.23623>

謝辞

高性能乾燥機の開発は、2020年度から2022年度までの3年間、やまぐち産業イノベーション促進補助金（通常枠・バイオ関連分野）の支援を受け山口大学・山口県産業技術センターと共同で実施した。記して、深謝の意を表します。