魚肉ソーセージをモデルとした食品乾燥工程中の あん蒸操作の定量的評価

小西靖之*・小林正義**

Quantitative Evaluation of Poultice Up Process in Forced Ventilation Drying of Foods Using a Fish Paste Sausage as a Model

Yasuyuki KONISHI* and Masayoshi KOBAYASHI**

* Hokkaido Industrial Technology Center, 379, Kikyochō, Hakodate-shi, Hokkaido 041-0801

** Department of Chemical System Engineering, Kitami Institute of
Technology, 165, Koencho, Kitami-shi, Hokkaido 090-8507

Effective parameters to evaluate the poultice up process (PUP) which has conventionally been used for forced ventilation drying processes of foods were newly proposed. Using a fish paste sausage as a model food, drying efficiency was quantitatively evaluated in connection with temperature and the PUP. The rate analysis of the redrying step after the introduction of PUP process presented an adequate diffusion mechanism of water in the sausage. We introduced two parameters: a drying rate ratio (R) which can evaluate acceleration rate due to the PUP and an effectiveness factor of drying time (E_f) which shows the reduced period of drying process due to the PUP. The R -value was effectively used to compare the drying rate and to determine the effective period for PUP-introduction in various drying conditions. The E_f -values were classified into two groups depending on the starting time of the PUP. The two characteristic aspects of E_f were reasonably explained by two different mechanisms of water diffusion according to the water content of the sample. It was proved that the values of R and E_f are useful to evaluate quantitatively the PUP.

(Received Aug. 8, 1997; Accepted Jan. 19, 1998)

機械乾燥による乾燥方法は水産物の場合は通風によるものが主流である。魚肉などの水産物の通風乾燥では、被乾燥物の表面蒸発速度に比べ内部水分の表面への拡散速度が遅く、減率乾燥期間が乾燥工程の大半を占める。このため、乾燥期間が長くなるに伴い被乾燥物の表面含水率が内部に比べ著しく低下し、被乾燥物表面の乾燥が進みすぎる表面硬化(ケース・ハードニング)が起こる。これは表面に形成された乾いた密度の高い層が、内部水分の表面への拡散を阻害し乾燥速度を低下させたり、表面にクラックなどを発生させ製品品質の低下を引き起こす¹⁾²⁾。水産物乾燥品の場合には製品製造コストに対する乾燥装置のランニングコストが大きな割合を占めるた

め、乾燥装置の動作時間(実乾燥時間)の短縮化が特に望まれている。

これらの改善策として、たとえば通風乾燥とマイクロ波を併用した乾燥の検討なども行われているが、装置のコストアップ等の理由により、安価な水産物乾燥品への応用は実現が難しい³⁾⁴⁾。そこで従来よりあん蒸操作が行われてきた。例えば、ホタテの貝柱の乾燥ではあん蒸はかかせない工程であり、鰹節では最終乾燥までに十数回のあん蒸工程を繰り返す。これは、通風乾燥工程の途中に表面と内部の含水率の不均一性が著しく大きくなったときに、乾燥操作を一旦停止し、被乾燥物を冷暗所に放置し水分の内部拡散を推進し、含水率の均一化を行う

* 北海道立工業技術センター (〒041-0801 北海道函館市桔梗町 379 番地)

** 北見工業大学化学システム工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

手法である。この工程の導入により、表面含水率の著しい低下を解消し、品質と乾燥速度の向上及び乾燥工程に関わるランニングコストを低減化できる。

通風乾燥における速度論的解析のために、従来より乾燥メカニズムや乾燥モデルについての多様な検討がなされてきた。JASON⁵⁾は魚肉の減率乾燥期について検討を行い、水の拡散係数は魚肉の厚みの自乗に反比例すると報告している。また、DEL VALLE ら⁶⁾は食塩水に浸漬した魚肉の乾燥期間について Fick の拡散係数の特徴を示す2つの期間があるとし、拡散係数と含水率の相関について報告している。最近では、酒井⁷⁾が魚肉厚みと乾燥速度について報告しており、乾燥速度は魚肉厚みには無関係であり、乾燥し得る水分量に比例するとしている。しかし、あん蒸工程については、その開始や終了時期、雰囲気条件、効果やメカニズムなどについて検討例は少なく、その最適操作の指針になるようなデータも皆無である。従って、実際のあん蒸操作は経験などに基いて行われてきた。このあん蒸工程を定量的に評価するためのパラメータを抽出し、それを用いて最適操作条件を明確化することができれば、現状の乾燥工程の低エネルギー化や乾燥製品の高品質化につながるとともに、あん蒸工程を積極的に利用した新しい複合乾燥技術の提案も可能となるであろう。

水産物等の乾燥特性を取り扱う場合、その水産物の漁獲時期、漁獲場所及びその水産物の部位によりその構成成分等が大きく異なり、安定した標準試料の確保が困難なため、本研究では魚肉ソーセージを乾燥モデル物質として用いた。この乾燥モデル物質は連続乾燥時の乾燥速度の経時変化の挙動が魚肉（ホッケ）のそれと比較的類

似していること（図1に両者の比較の一例を示した）、また乾燥初期の水分の有効拡散係数も同程度（JASON⁵⁾の式より求めた、35℃時、ホッケ：約 $6.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ 、魚肉ソーセージ：約 $8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ ）であることの2つの理由より選択した。

本研究ではこの乾燥モデル物質の連続通風乾燥工程中、任意の時間にあん蒸操作を挿入した時の乾燥速度の応答形態を追跡した。あん蒸効果を定量的に評価できる新しいパラメータを提案し、そのパラメータを用いて多様な乾燥温度や含水率の環境下にある試料について、あん蒸操作挿入により引き起こされた乾燥速度変化の動特性を測定、解析し、乾燥プロセスの特性化を行った。

実験方法

1. 試料

乾燥試料は、市販の魚肉ソーセージ（T社製）を用い、 $\phi 20 \cdot L 40 \text{ mm}$ の大きさ（円柱状）に整形し乾燥試験に用いた。この試料の重量は約19gで、初期含水率（ w_0 ）は70.1%-W.B.であった。また、図1に示した魚肉ソーセージとの乾燥速度比較に用いたホッケは、H7年北海道知内沖で漁獲されたものであり、 $W 20 \times D 15 \times L 40$ の大きさ（角柱状）に整形した重量約19gのものをテストに用いた。乾燥試料に用いた魚肉ソーセージ及び一般的なホッケの成分分析値を表1に示した。ここで、本実験で用いた乾燥試料（魚肉ソーセージ）及び乾燥テスト温度 T_D などの条件では、恒率乾燥期間の特徴である乾燥速度の一定値の過程は認められないこと、また食品内部温度測定センサーによる外表面部の温度測定でも、湿球温度の一定値後の温度上昇の挙動は確認されないこと、これらの結果から本試料の場合、乾燥過程が減率乾燥期から開始しているとした。

図1 乾燥モデル物質（魚肉ソーセージ）と魚肉（ホッケ）の連続乾燥時における乾燥速度の経時変化の比較（乾燥温度 $T_D=35^\circ\text{C}$ ）

表1 乾燥モデル物質（魚肉ソーセージ）と一般的な魚種ホッケ肉の成分分析値

	分析値 (100g あたり)	
	乾燥試料 (魚肉ソーセージ)	ホッケ*
たんぱく質	10.2 g	17.0 g
脂 質	5.6 g	4.7 g
糖 質	12.0 g	0.1 g
水 分	70.1 g	76.8 g
灰 分	2.1 g	1.4 g

*「四訂 日本食品標準成分表」より

2. 乾燥及びあん蒸操作方法

用いた乾燥装置の内室寸法はW 420×D 430×H 430 mmであった。乾燥用空気は送風機により装置に導入し、1130 Wのシーズヒータにより設定温度に加熱後、整流部、乾燥試料部を通り排気される。空気は外気を直接導入し、湿度調整は行わなかった。試料は、約10 meshのステンレス製網でできた試料皿に載せ、乾燥室内の底面より200 mm上部に設置した。乾燥テスト温度 T_D は、冷風乾燥温度域から温風乾燥温度域の代表的温度として $T_D=35, 50, 70^\circ\text{C}$ で行い、連続乾燥工程中に挿入するあん蒸工程開始含水率範囲は $w_0=56\sim 33\%\text{-W.B.}$ 、あん蒸時間は36時間とした。この時、この時間以上のあん蒸は、その後の再乾燥工程の初期乾燥速度に変化を与えないことを確かめた。あん蒸工程は、表面からの水分の蒸発を押さえるためにビニル容器に密閉した試料を、あらかじめ庫内温度を 2°C ($\pm 0.5^\circ\text{C}$)に制御してあるインキュベーターの中に保管する方法を用いた。

3. 含水率変化の測定

乾燥試料の重量変化は、乾燥工程中に定期的に電子天秤(最小10 mmg)により直接測定することにより行った。乾燥速度は、乾燥前の乾燥サンプル100 gに対する1時間当たりの水分減少量(g)として示した。

実験結果及び考察

1. あん蒸操作による乾燥速度の変化

図2はあん蒸操作を挿入した試料の乾燥速度の変化を、あん蒸操作を行わないで連続的に乾燥を行った試料の応答曲線(実線)と比較して示したものである。試料初期含水率(w_0)が70.1%-W.B.の乾燥サンプルを設定乾燥温度 $T_D=35^\circ\text{C}$ で通風乾燥させている途中に、所定

図2 あん蒸操作による乾燥速度の変化
(乾燥温度 $T_D=35^\circ\text{C}$)

の含水率 w_0 ($56\sim 33\%\text{-W.B.}$ 範囲における任意の点)になった時点で、そのサンプルの乾燥操作を一旦停止し、あん蒸工程(36時間)に移行する。その後再度乾燥工程にかけたときの含水率と乾燥速度変化との関係を連続乾燥操作データと重ねて示してある。あん蒸操作後の再乾燥初期速度(図2にa, b, c, d点で示した。このとき各点はそれぞれ新しい試料を用いた結果である。)は、あん蒸操作を行わない連続乾燥の場合に比べ数倍高い値となる。これはあん蒸操作の効果により試料内部水分が表面層へ拡散移動し、表面層の含水率が増加したことによる。

このあん蒸操作による乾燥速度の増加割合は、その後の再乾燥の進行による含水率(w 値)の低下と共に徐々に小さくなり、あん蒸操作を行わなかった連続乾燥のものに漸近する。このあん蒸操作による乾燥速度の増加効果は乾燥温度や再乾燥開始時含水率に依存せず、図2のa, b, c, d点より w 値の変化分(図中 Δw で示した)が $5\sim 12\%\text{-W.B.}$ になった時点で消失する(連続操作曲線=実線に合致する)。

図3はあん蒸効果の物理的意味を模式的に説明したものである。ここで図中の〔乾燥中〕は乾燥の開始からあん蒸直前までの含水率分布($t_0\sim t_4$ とする)の時間変化を示したものである。乾燥開始時は試料内の含水率が均一な $[t_0]$ のような状態にあるが、乾燥工程の進行に伴い表面の水分蒸発に対し内部水分の拡散が遅いために表面と中心部の含水率分布に差が生じ $[t_4]$ の様な含水率分布となる。次に図中〔あん蒸中〕では、試料表面から気相への水分蒸発がラップ(ポリエチレンフィルム)による包装により阻止されているので、水分移動は内部移動のみとなる。即ち、含水率分布が表面・内部で均一になるような水分移動が起こり、分布は $[t_4]\rightarrow[t_8]$ のように変わる。次に図中〔再乾燥中〕では $[t_8]$ から始まり、乾燥の進行に伴い再度内部の含水率に強い分布が生じ $[t_{12}]$ のようになる。こうして試料中の平均含水率は乾燥時間の経過と共に次第に低下する。この時〔あん蒸中〕の $[t_4]$ と〔再乾燥中〕の $[t_8]$ を比較すると、両者は被乾燥物全体の平均含水率は同一であるが、表面層の含水率は明らかに $[t_8]$ の方が高く、大きい乾燥速度を与える。これがあん蒸操作による乾燥速度の増加効果である。

2. 乾燥速度比(R)

同一含水率(x)を基準にして(図2の横軸)、あん蒸操作後の再乾燥時の初期乾燥速度(図2のa, b, c, d点)に対する、あん蒸を行わない場合の連続乾燥速度(例えばa点に対してはr点)との比を乾燥速度比(R)とし

図 3 乾燥及びあん蒸工程中の水分移動の概念図

て、次式のように定義する。

乾燥速度比 (R) =

$$\frac{\text{含水率 } x \text{ 時点でのあん蒸工程挿入後の再乾燥初期速度 (g-水 h} \cdot 100 \text{ g)}}{\text{連続乾燥工程における含水率 } x \text{ 時点での乾燥速度 (g-水 h} \cdot 100 \text{ g)}}$$

.....[1]

この R 値の大きいもの程、あん蒸効果の有効性が高いことを示す。図 4 は R 値を、あん蒸開始含水率に対し整理したものである。 R 値は本研究の全試験操作条件において、約 1.8~3.5 倍程度であった。この R 値はあん蒸操作を開始する時の試料含水率が低いほど大きな値を与え、あん蒸操作の有効性が高いことが分かる。また乾燥温度に対しては、明らかな依存性は認められなかった。

3. 乾燥時間有効係数 (E_f)

図 5 は異なる 2 つの乾燥操作 (あん蒸操作を挿入した場合としない場合、 $T_D=35^\circ\text{C}$ 、 $w_D=70.1\%\text{-W.B.}$) について含水率の乾燥時間に対する減少挙動の代表例を示したものである。ここであん蒸操作 (あん蒸操作開始時の含水率 $w_0=55.7\%\text{-W.B.}$) を挿入した試料 (図 5 の実線) については、あん蒸工程に要した時間は考慮せず、実際に乾燥工程に要した時間を乾燥時間として整理した。両者を比較すると、あん蒸操作を用いたものは、その乾燥

図 4 あん蒸操作開始含水率 (w_0) に対する乾燥速度比 (R) の依存性

速度の増加効果のため、同一含水率に至る乾燥時間は連続乾燥操作に比べ短くなる傾向を示す。この様な乾燥条件や操作内容の改善による乾燥時間の短縮効果を定量的に評価するために、乾燥操作の異なる各種試料の同一含水率 (ここでは図 5 中の $w=45\%\text{-W.B.}$) に達するまでの乾燥時間 (図 5 の t_1 及び t_2) の比を乾燥時間有効係数 (E_f) と名づけ、次のように定義する。

乾燥時間有効係数 (E_f) =

あん蒸工程を挿入した場合の w_D から
任意の w に達する乾燥時間 t_1 (min)

連続乾燥操作での w_D から w に達する
乾燥時間 t_2 (min)

.....(2)

$E_f=1$ の時はあん蒸工程挿入による乾燥時間短縮効果が無いことを示し, $E_f<1$ の時にはその効果があることを示す。例として乾燥温度 $T_D=35$ 及び 50°C におけるあん蒸開始含水率の違いによる E_f 値の変化について整理したのがそれぞれ図6, 7である。 E_f 値の挙動はあん蒸開始時の含水率 w_0 により著しく異なる2つのグループに分けることができる。あん蒸操作開始含水率を $w_0>50\%$ -W.B. とした場合 (図6, 7中のIのグループ), 試料の含水率が低下するに伴い E_f 値は $0.82\sim0.87$ から次第に大きくなり1に近づき, あん蒸効果は低下する。一方, あん蒸操作を $w_0<45\%$ -W.B. で行った場合 (図6, 7中のIIのグループ) では, 試料の含水率低下による E_f 値の変化は小さく, 試料含水率が 15% -W.B. 程度まで乾燥させた場合でも E_f 値は $0.82\sim0.90$ となり乾燥時間の短縮効果は維持されることが分かる。これらの結果は, あん蒸工程挿入をどの含水率の時にに行うかにより, E_f 値は大きく変化し特徴的な形態を与えることを示している。

水産物の乾燥工程に関わるランニングコストは, 用いる乾燥装置, 乾燥条件, 使用魚種あるいは調味方法などにより異なるため定量的考察は難しいが, 一例として含水率を 20% -W.B. 程度まで乾燥するサケの乾製品 (サケトバ) について以下に定性的考察を加える。この製品の乾燥装置のランニングコストは全製造コストの $40\sim$

図5 あん蒸操作の有無による含水率経時変化の違い (乾燥温度 $T_D=35^\circ\text{C}$, t_1 : あん蒸操作ある場合の $w=45\%$ -W.B. に到達する時間, t_2 : あん蒸操作無い場合の $w=45\%$ -W.B. に到達する時間)

図6 乾燥時間有効係数 (E_f) の試料含水率 (w) 依存性に対するあん蒸操作開始含水率 (w_0) の影響 (乾燥温度 $T_D=35^\circ\text{C}$)

図7 乾燥時間有効係数 (E_f) の試料含水率 (w) 依存性に対するあん蒸操作開始含水率 (w_0) の影響 (乾燥温度 $T_D=50^\circ\text{C}$)

50% を占める。たとえば本報告の乾燥時間短縮効果を当てはめると, 最適なタイミングであん蒸操作を用いることにより, 乾燥装置のランニングコストは $10\sim15\%$ 低減可能と考えられる。一方あん蒸操作に要するコストは乾燥装置の実運転費用に比べ非常に小さいと思われる。こうして, 乾燥工程中どの時点であん蒸操作を導入するかにより, その経済性が著しく変化する分岐点を決定する (最適操作点) には, この E_f 値より重要な操作指針の情報を提供出来ると考えられる。

従って, この E_f 値はあん蒸工程の有効性を評価するパラメータのひとつとして使えることを示唆している。

4. 水分拡散機構

先に示した図6及び7の結果から, あん蒸操作開始時の含水率が $w_0>50\%$ -W.B. (グループI) の時と $w_0<45\%$ -W.B. (グループII) の時とでは E_f 値の挙動に著し

い違いがあると述べた。この違いについて、試料中の水分の拡散機構に視点を置いて考察する。

含水率の高い食品の乾燥工程は、一般に恒率乾燥期間と減率乾燥期間の2つのステップにより進行するといわれている⁸⁾。乾燥初期における恒率乾燥期間では表面の水分の蒸発が乾燥速度を律速しており、この時乾燥速度は含水率には影響されず、乾燥空気の流れ、温度、相対湿度等に依存する。一方、乾燥工程がある程度進行した減率乾燥期間では内部水分の表面への拡散が律速であり、乾燥速度は含水率の減少に伴って小さな値となる。たとえば水産物などの乾燥工程は、恒率乾燥時間は非常に短く、大部分は減率乾燥期間により進行する。この期間の報告例として、JASON⁵⁾は魚肉の連続乾燥時の拡散係数を測定し、減率乾燥期間を拡散係数値が異なる2つのphaseに分類している。DEL VALLら⁶⁾も塩漬魚の減率乾燥期間に注目し、Fickの拡散係数の特徴を示す2つの異なるphaseにより乾燥が進行するとしている。この減率乾燥期間の内部水分の表面への移動機構として、含水率が高い乾燥初期にはステップ(1)として水分は液状のまま内部から表面へ拡散し、蒸発は材料表面で起こる。乾燥が進行し含水率が低下した時にはステップ(2)として水分は材料内部のある点まで液状で移動しその点で蒸発した後表面まで蒸気として拡散する。こうして含水率によって変化する2段階モデルが提案されている⁹⁾。従って減率乾燥期間の初期には(1)の機構で水分移動が起こり、含水率の減少に伴い(2)の機構に移行すると理解されている。

この考えに従うと、一つの可能性として図6、7のグループⅠではステップ(1)の機構が、グループⅡではステップ(2)の機構が支配的に水分拡散していると考えられる。この考えは、含水率変化から求めた水の拡散係数の挙動からも支持されるが、その詳細は統報にゆずる。

要 約

円柱状の魚肉ソーセージをモデル物質として種々の条件下で通風乾燥を行うとともに、乾燥途中にあん蒸操作を

行い、あん蒸操作の乾燥速度に対する効果及び水分拡散機構について検討を行った。

(1) 乾燥工程途中のあん蒸操作挿入は、あん蒸操作を行わない連続乾燥に比べ乾燥速度比(R 値)で約1.8~3.5倍高い値を与える。

(2) R 値は、乾燥温度 T_D にはほとんど依存せず、あん蒸開始含水率(w_0)が低いほど大きな値を与える。

(3) あん蒸操作による乾燥時間短縮効果を表す乾燥時間有効係数(E_f 値)は、あん蒸操作開始時の含水率(w_0)によって著しく異なる。 $w_0 > 50\% \text{-W.B.}$ の時、試料含水率の低下に伴い E_f 値は0.82から1.0に近づきその効果が減少する。一方 $w_0 < 45\% \text{-W.B.}$ の時、 $E_f = 0.82 \sim 0.90$ を与え、その効果が大きく保たれる。こうして w_0 値によって E_f 値が大きく異なる2つの領域のあることを明らかにした。

(4) 新しく導入した R 値及び E_f 値より、あん蒸操作を最適に行うための操作設計ができることを明らかにした。

文 献

- 1) 三輪勝利：水産加工品総覧（光琳，東京），p. 4（1983）。
- 2) 野口 駿：食品と水の科学（幸書房，東京），p. 204（1992）。
- 3) 赤星亮一・又重英一：日食工誌，29，587（1982）。
- 4) 赤星亮一・又重英一：日食工誌，37，581（1990）。
- 5) JASON, A. C. : Fundamentel Aspects of Dehydration of Food Stuffs (McMillan, London). p. 103 (1958).
- 6) DEL VALLE, F.R. and NICKERSON, J.T.R. : *J. Food Sci.*, 33, 499 (1968).
- 7) 酒井 信：日食工誌，40，849（1993）。
- 8) 室谷幸男：水産加工機械（恒星社厚生閣，東京），p. 181（1987）。
- 9) 太田冬雄：水産加工技術（恒星社厚生閣，東京），p. 85（1986）。

（平成9年8月8日受付，平成10年1月19日受理）