

# 魚肉ソーセージの水分移動メカニズムの解析

小西 靖之\*・小林 正義\*\*

(平成9年9月22日受理)

## Water Diffusion Mechanism in a Fish Paste Sausage during a Characterized Drying Process

Yasuyuki KONISHI\* and Masayoshi KOBAYASHI\*\*

### Abstract

To quantitatively evaluate the poultice up process (PUP), which is conventionally used in ventilation food drying processes, the influences of drying efficiency by temperature and PUP were studied in detail, using a fish paste sausage as a model food. An adequate water diffusion mechanism was obtained through the rate analysis of the redrying step after the introduction of the PUP process. Two new parameters for PUP evaluation were introduced: (1) drying rate ratio ( $R$ ), which allows evaluation of the acceleration rate due to PUP: and (2) saved drying time ( $ST$ ), which shows the reduced time for the period of drying process due to PUP. For the two parameters, it was found that PUP for the lower water content of the sausage ( $w_0 < 45\% - W. B.$ ) gave high  $R$ -value and a constant  $ST$  value ( $> 150$  min) for the drying process. The  $ST$  values obtained were classified into the two groups, depending on the initial  $w_0$  of PUP. It was found that the starting  $w_0$  of PUP was an important factor in determining the efficiency of the drying process used.

### 1. 緒 言

水産物乾燥は水産物の貯蔵法として生まれた、古くから用いられている加工法である。近年では価格の低い漁獲物への付加価値の付与や、消費者の多様なニーズに対応した水産物の提供などを目的に、地域の実状に即した乾燥技術、装置の開発に取り組みがなされている。乾燥方式としては天日乾燥と機械乾燥に大別できるが、天日乾燥の場合、製品の品質が自然条件により影響されることや計画生産が難しい等の欠点があり、機械乾燥が主流となっている。しかし機械乾燥の場合、乾燥装置の機能を十分に生かし、低ランニングコストで品質の優れた製品を製造するためには、原料である水産物の乾燥特性に応じた装置の設計や操作が重要である。

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の場合、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

\* 北海道立工業技術センター 研究開発部 メカトロニクス科

\*\* 北見工業大学 化学システム工学科

期間が乾燥工程の大半を占めてしまう。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。この表面硬化層は内部水分の表面への拡散を阻害し乾燥速度を低下させるとともに、表面にクラックなどを生じ製品品質の低下などを引き起こしてしまう。<sup>1)</sup> これらの対策として、通風乾燥とマイクロ波などを併用した乾燥などについての検討も行われているが、安価な水産物乾燥品への応用又は適用は装置のコストアップ等の理由より、現状ではその実現が難しい。<sup>2)</sup> これらの表面と内部の含水率の不均一性を緩和する改善策として、従来よりあん蒸操作が行われている。これは、通風乾燥工程の進行に伴い表面と内部の含水率の不均一が著しくなったときに、乾燥操作を一旦停止し、被乾燥物を冷暗所で放置し水分の内部拡散を図り、含水率の均一化を行う操作である。一例としては、サケトバや鯉節の乾燥時に用いられている。この工程により、表面含水率の著しい低下を解消し、品質や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の低減化を図ることができる。

水産物の通風乾燥については、従来より乾燥速度や乾燥機構についての検討がなされてきている（Table 1 参照）。

Table 1 水産物乾燥関連の代表的研究報告例

文献	研究者	研究内容	
3	Jason, A. C.	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	1958
4	Del Valle et al.	食塩水に浸漬した魚肉の乾燥期間について検討 拡散係数と含水率の相関について検討	1968
5-6	横屋敬七ら	コンブの乾燥速度、乾燥収縮、内部組織変化について研究	1976
7	鈴木一之ら	鯉節の乾燥工程途中のあん蒸工程にマイクロ波を用いて、あん蒸時間の短縮を図る	1989
8	松岡孝尚	塩水処理したアジの乾燥特性、水分拡散係数を求める	1989
9	Rahman et al.	イカの熱風乾燥時の密度、体積変化式の導出	1990
10	酒井 信	マグロの熱風乾燥時の厚みと乾燥速度の相関について検討	1993
11	Kannan et al.	熱帯産魚の温度、湿度、風速に対する乾燥特性調査 拡散モデルを用いた魚体の乾燥時間の予測式	1995

Jason<sup>3)</sup> は魚肉の減率乾燥期について水の拡散係数と脂質量の相関の検討を行い、拡散係数の違いより減率乾燥期には異なる2つの段階があると報告している。松岡<sup>8)</sup> はアジの通風乾燥に取り組み、乾燥材料の形状や保存状態による乾燥特性や水分拡散係数を求めている。また、Rahmanら<sup>9)</sup> はイカの熱風乾燥について研究を行い、乾燥時の密度、体積変化式の提案を行っている。しかし、あん蒸工程については乾燥工程中のどの様なタイミングや条件で挿入するかは、乾燥製品の品質や製造費用に大きく影響を与えるため、非常に重要な操作であるにも関わらず、あん蒸工程の開始や終了時期、雰囲気条件、効果やメカニズムなどについて検討例はほとんど無く、唯一鈴木ら<sup>7)</sup> が鯉節のあん蒸工程にマイクロ波を用いるとともにあん蒸工程中の含水率の均一化挙動について測定した例があるが、操作の指針になるようなデータの報告例は皆無である。このため、実際のあん蒸操作は経験などに基いて行われている例がほとんどである。これらのあん蒸工程の最適操作条件を定量的に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の可

合乾燥技術の提案の可能性がある。

本研究ではあん蒸工程のメカニズム解明とその最適操作指針の提案を目標に、魚肉ソーセージを被乾燥モデル物質として用い、あん蒸工程を含む通風乾燥実験を行った。あん蒸効果を定量的に評価するために、あん蒸開始含水率に注目するとともに、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、あん蒸工程の定量的評価を行った。(Fig. 1)

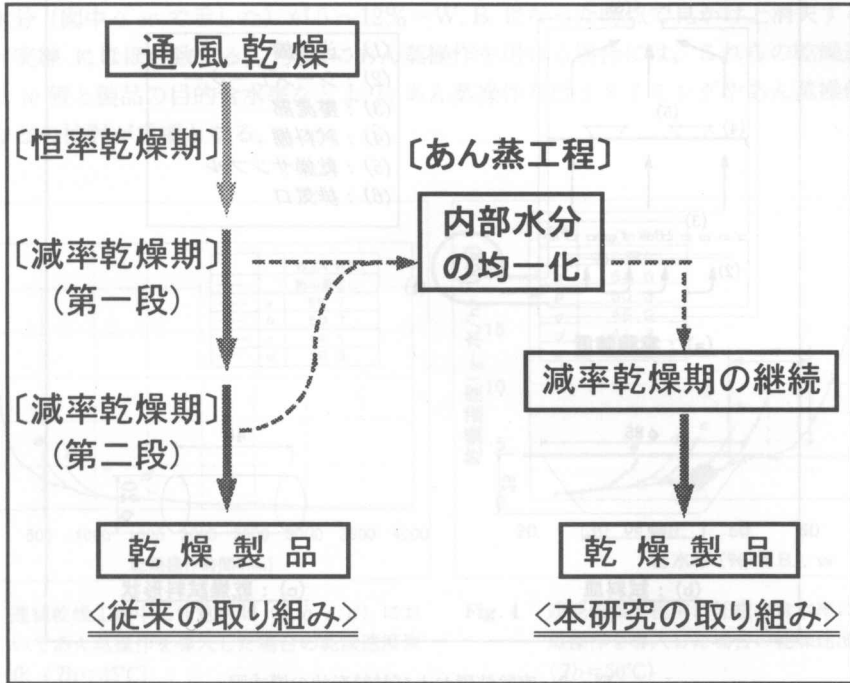


Fig. 1 研究推進プロセス図

## 2. 実験方法

乾燥試料は、市販の魚肉ソーセージ (T社製) を用い、 $\phi 20 \times L40$  (円柱状) の大きさに整形し乾燥試験に用いた。(Fig. 2-c) この試料の重量は約19gで、初期含水率 ( $w_D$ ) は70.1%-W.B. (湿量基準含水率) であった。

実験装置の概略を Fig. 2-a に示す。乾燥装置の乾燥室の内寸は  $W420 \times D430 \times H430$  で乾燥室底面より200mmの高さに乾燥試料を設置した。乾燥用空気は送風機により乾燥装置に導入し、1130W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。乾燥空気は外気を直接導入し、湿度調整は行わなかった。乾燥試料は、約10meshのステンレス製網でできた試験皿 (Fig. 2-b) に載せ、乾燥室内の底面より200mm上部に設置した。

あん蒸工程は、乾燥試料をポリエチレンフィルムに密閉し試料表面からの水分の蒸発を押さえたものを、あらかじめ用意した庫内温度を一定温度 ( $+2^\circ\text{C}$ ) 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。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10mg) により直接測定することにより求めた。乾燥速度は、乾燥前の乾燥サンプル100g に対する1時間当たりの水分減少量 (g) として示した。

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  $T_D = 35^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}, 70^\circ\text{C}$  の 3 温度で行い, あん蒸開始含水率 ( $w_0$ ) は  $56 \sim 33\% - \text{W. B.}$ , あん蒸時間は 36 時間とした. このあん蒸時間については, 水分の内部拡散度合いが乾燥速度等に影響するため, 表面と内部の含水率が十分均一になる時間として設定した.

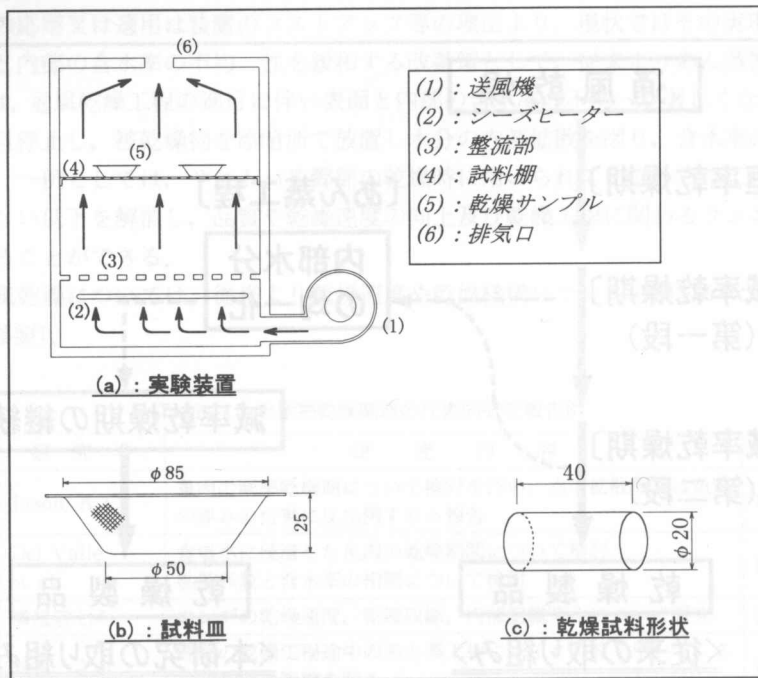


Fig. 2 実験装置および試料形状の模式図

### 3. 結果及び考察

#### 3-1 あん蒸操作による乾燥速度の変化

Fig. 3 にあん蒸操作による乾燥速度の変化を, あん蒸操作を行わないで連続的に乾燥工程を操作した応答曲線 (実線) と比較して示した. 初期含水率 ( $w_D$ ) が  $70.1\% - \text{W. B.}$  の乾燥サンプルを設定温度  $T_D = 35^\circ\text{C}$  で通風乾燥させている途中に, 所定の含水率 ( $56 \sim 33\% - \text{W. B.}$  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工程を一旦停止し, あん蒸工程 (36 時間) に移行し, 再度乾燥工程にかけたときの乾燥操作時間と乾燥速度の状況を調べた. 乾燥操作時間は, あん蒸工程の時間を含まない実乾燥操作時間として示し, 乾燥速度は, 乾燥前の乾燥サンプル  $100 \text{ g}$ , 1 時間当たりの水分減少量 ( $\text{g}$ ) として示した. あん蒸工程後の再乾燥初期速度は, 連続乾燥の場合に較べ約 2 ~ 3 倍の値となる. このあん蒸操作による乾燥速度の増加効果は乾燥工程の進行に伴い徐々に小さくなり, 連続乾燥の乾燥速度に漸近する.

Fig. 4 は設定温度  $T_D = 50^\circ\text{C}$  時のあん蒸操作を挿入した試料の乾燥速度の含水率に対する変化を, 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. あん蒸操作後の再乾燥初期速度 (Fig. 4 に  $a, b, c, d, e$  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較べ数倍高

い値となる。つまり、あん蒸操作により含水率に対する乾燥速度は増加する事が分かる。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、Fig. 4 の  $a, b, c, d, e$  点より  $w$  値の変化分 (図中  $\Delta w$  で示した) が 5~12% - W.B. になった時点で見かけ上消失する (連続操作曲線 = 実線 にほぼ合致する)。実際にあん蒸操作を用いる場合には、これらの乾燥速度の増加割合や  $\Delta w$  値と製品の目的含水率などより、あん蒸操作を行うタイミングやあん蒸操作を複数回用いるなどの検討が重要となる。

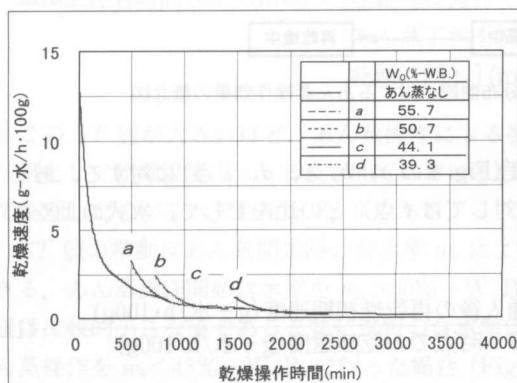


Fig. 3 連続乾燥工程中に任意時間 ( $a, b, c, d$ ) においてあん蒸操作を導入した場合の乾燥速度変化 ( $T_b=35^\circ\text{C}$ )

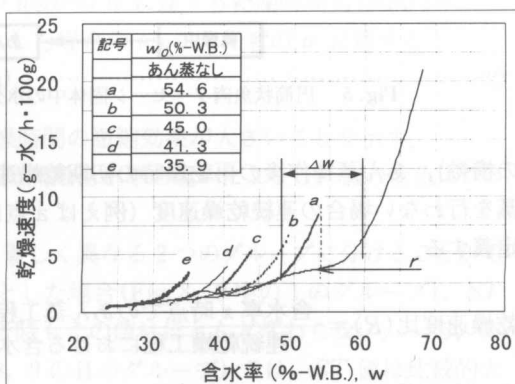


Fig. 4 連続乾燥工程中に任意の含水率においてあん蒸操作を導入した場合の乾燥速度変化 ( $T_b=50^\circ\text{C}$ )

Fig. 5 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  $[t_{12}]$  の様になる。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。

### 3-2 乾燥速度比 ( $R$ )

あん蒸操作による乾燥速度の増加効果を、あん蒸開始含水率や乾燥温度に対して定量的に評価するために、乾燥速度比 ( $R$ ) を新たに用いた。この  $R$  値は同一含水率 ( $x$ ) を基準にして (Fig. 4

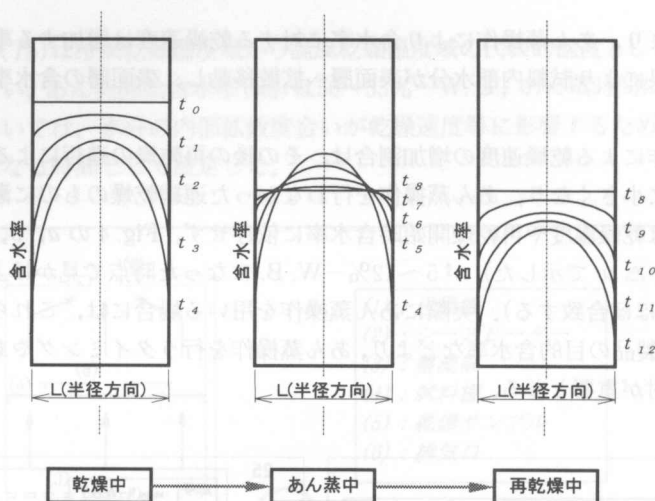


Fig. 5 円筒状魚肉ソーセージ固体中の水分分布曲線に対するあん蒸操作効果の概念図

の横軸), あん蒸操作後の再乾燥時の初期乾燥速度 (Fig. 4 の a, b, c, d, e 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) との比をとして, 次式のように定義する.

$$\text{乾燥速度比}(R) = \frac{\text{含水率 } x \text{ 時点でのあん蒸工程挿入後の再乾燥初期速度 (g-水/h}\cdot\text{100g)}}{\text{連続乾燥工程における含水率 } x \text{ 時点での乾燥速度 (g-水/h}\cdot\text{100g)}} \quad \dots(1)$$

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. Fig. 6 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. これは, 先に述べた通風乾燥による乾燥物の表面硬化の度合いが, 連続乾燥の場合は低含水率ほど大きいためであると推察される. 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.

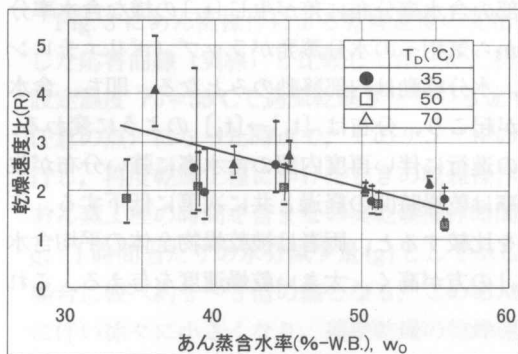


Fig. 6 乾燥速度比  $R$  のあん蒸開始含水率 ( $w_0$ ) に対する依存性

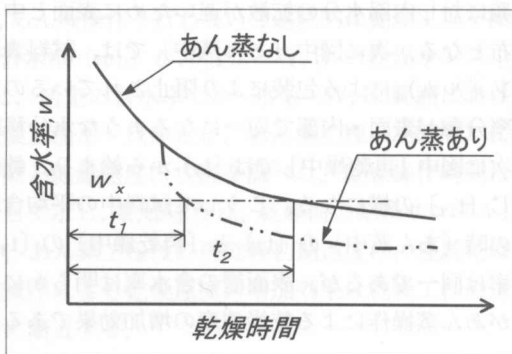


Fig. 7 あん蒸操作による乾燥時間の短縮効果を示す模式図 (乾燥工程省時間 (ST) =  $t_2 - t_1$ )



### 3-3 乾燥工程省時間 (ST)

Fig. 7 はあん蒸操作を挿入した場合としない場合の異なる2つの乾燥操作について、乾燥時間に対する含水率の減少挙動を模式的に表したものである。ここであん蒸操作（あん蒸操作開始時の含水率  $w_0$ ）を挿入した試料 (Fig. 7 の2点鎖線) 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表してある。あん蒸操作を用いたものは、その乾燥速度の増加効果のため、同一含水率 (Fig. 7 の  $w_x$ ) 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、同一含水率 ( $w_x$ ) に達するまでのあん蒸操作を用いた場合と連続乾燥時との乾燥時間 (Fig. 7 中の  $t_1$  及び  $t_2$ ) の差を乾燥工程省時間 (ST) とし、次のように定義する。

$$\text{乾燥工程省時間 (ST) (min)} = [\text{連続乾燥操作での } w_D \text{ から } w \text{ に達する乾燥時間 } t_2 \text{ (min)}] - [\text{あん蒸工程を挿入した場合の } w_D \text{ から任意の } w \text{ に達する乾燥時間 } t_a] \text{ (min)} \dots\dots\dots (2)$$

この ST 値が大きいくほど、あん蒸操作による乾燥時間の短縮効果が大きいことを示す。

例として乾燥温度  $T_D = 35$  及び  $50^\circ\text{C}$  におけるあん蒸開始含水率の違いによる ST 値の変化について整理したのがそれぞれ Fig. 8, 9 である。

ST 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  $w_0 > 50\% - \text{W.B.}$  とした場合 (Fig. 8, 9 中の I のグループ), ST 値は比較的小きな値であると共に試料の含水率低下時にもこの値はほとんど変わらない。一方、あん蒸操作を  $w_0 < 45\% - \text{W.B.}$  で行った場合 (Fig. 8, 9 の II のグループ) では、ST 値は比較的大きな値であると共に試料の含水率の低下にともない ST 値の値も徐々に大きくなる。これらの結果は、あん蒸工程挿入をどの含水率の時に行うかにより、乾燥工程の時間短縮効果が大きく異なることを示している。

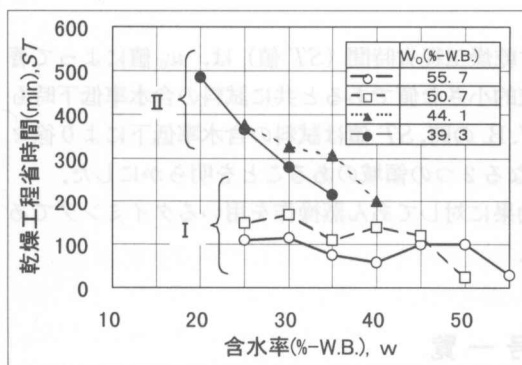


Fig. 8 あん蒸開始含水率 ( $w_0$ ) の違いによる乾燥工程省時間 (ST) の挙動の変化 ( $T_D = 35^\circ\text{C}$ )

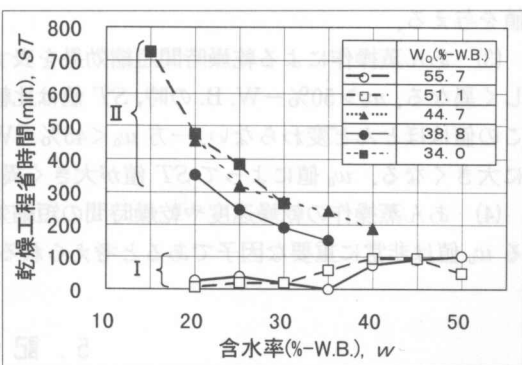


Fig. 9 あん蒸開始含水率 ( $w_0$ ) の違いによる乾燥工程省時間 (ST) の挙動の変化 ( $T_D = 50^\circ\text{C}$ )

### 3-4 水分拡散機構

先に示した Fig. 8 及び9の結果から、あん蒸操作開始時の含水率が  $w_0 > 50\% - \text{W.B.}$  (グループ I) の場合と  $w_0 < 45\% - \text{W.B.}$  (グループ II) の場合とでは、ST 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ついて考察してみることにする。

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言われている。<sup>12)</sup> 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、恒率乾燥期間は非常に短く、大部分は減率乾燥期間により進行する。この期間の内部水分の表面への移動機構として、含水率が高い時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。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。

Fig. 8, 9 のグループ I, II では、支配的な水分移動機構の違いよりあん蒸工程による乾燥時間短縮効果の持続含水率幅の大きさに反映している可能性が推察される。つまり、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が拡散していると考えられる。

#### 4. 結 論

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較べ乾燥速度比 ( $R$  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工程省時間 ( $ST$  値) は、 $w_0$  値によって著しく異なる。 $w_0 > 50\% - W. B.$  の時、 $ST$  値は比較的小さな値であると共に試料の含水率低下時この値はほとんど変わらない。一方  $w_0 < 45\% - W. B.$  の時、 $ST$  値は試料の含水率低下により徐々に大きくなる。 $w_0$  値によって  $ST$  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) あん蒸操作の乾燥速度や乾燥時間の短縮効果に対してあん蒸操作を用いるタイミングである  $w_0$  値は非常に重要な因子であると考えられる。

#### 5. 記号一覧

$w$ : 含水率 (%-W. B.)	$T_D$ : 乾燥温度 ( $^{\circ}C$ )
$w_D$ : 初期含水率 (%-W. B.)	$R$ : 乾燥速度比 (-)
$w_0$ : あん蒸開始含水率 (%-W. B.)	$ST$ : 乾燥工程省時間 (min)
$\Delta w$ : 含水率幅 (%-W. B.)	



## 参考文献

- 1) 野口駿：食品と水の科学・p204・幸書房・東京・(1992)
- 2) 赤星亮一，又重英一：日食工誌，Vol 29，587-595(1982)
- 3) Jason, A. C.: Fundamental Aspects of Dehydration of Food Stuffs (McMillan, London). p103(1958)
- 4) Del Valle, F. R. and Nickerson, J. T. R.: J. Food. Sci., 33. 499-503(1968)
- 5) 横屋敬七：農化Vol. 50, No. 4, 151-156(1976)
- 6) 横屋敬七：農化Vol. 51, No. 5, 281-286(1977)
- 7) 鈴木一之，本杉正義，鈴木敏博：静岡県工業技術センター報告書，No. 34, 81-84(1989)
- 8) 松岡孝尚：高知大学学術研究報告，38巻，67-75(1989)
- 9) Rahman, Md and Potluri, P. L.: J. Food. Eng., 12. 133-143(1990)
- 10) 酒井 信：日食工誌，Vol 40, 849-853 (1993)
- 11) D. Kannan and S. Bandypadhyay: J. Food sci. Technol., Vol. 32, No. 1, 13-16 (1995)
- 12) 太田冬雄：水産加工技術・p85・恒星社厚生閣・東京・(1986)

## Abstract 訳

通風乾燥工程に用いられているあん蒸操作の定量的評価を行うために、乾燥モデル物質として魚肉ソーセージを用いて、乾燥温度、あん蒸タイミング（あん蒸開始含水率： $w_0$ ）等の乾燥効率への影響及びあん蒸条件の再乾燥速度や水分拡散機構への依存性について詳細に検討した。あん蒸操作による乾燥速度の増加割合を示す乾燥速度比（ $R$  値）とそれによる乾燥時間の短縮を表す乾燥工程省時間（ $ST$  値）の異なる2つのパラメータを新たに用いた。 $R$  値及び  $ST$  値の解析結果より、低含水率（ $w_0 < 45\% - W. B.$ ）でのあん蒸操作は乾燥速度の増加効果が大きく、乾燥時間の短縮効果も安定している（ $ST > 150\text{min}$ ）ことが明らかとなった。またあん蒸操作による乾燥時間の短縮効果は、 $w_0$  値によって大きく異なる2つのパターンに分かれることを明らかにした。更に、あん蒸操作の効果にはその操作を挿入するあん蒸タイミング（ $w_0$ ）が重要なファクターであることを明らかにした。