

通風乾燥工程中の食品内水分移動機構の解析

小西 靖之*・小林 正義**

(平成10年4月30日受理)

Diffusion Mechanism of Water in a Fish-Paste Food during a Drying-Process with Forced Ventilation.

Yasuyuki KONISHI* and Masayoshi KOBAYASHI**

Abstract

Diffusion kinetics of water in a fish paste food containing various amounts of moisture during a drying process with forced ventilation was investigated in detail and an equation explaining the drying behavior of food moisture ratio was proposed. The kinetics analysis of water diffusion was studied by using diffusion coefficient (De) evaluated at various starting moisture contents (Ws). The De -values obtained were drastically varied with Ws and their behavior was classified in two regions by the value of Ws : Region I ($Ws > 100\%$ -d. b.) in which De was increased with Ws and region II ($Ws < 100\%$ -d. b.) in which De gave nearly constant value independent of Ws . The characteristic behavior of the moisture ratio was consistently explained by the proposed double exponential model.

1. 緒 言

食品乾燥の分野では比較的単純な通風乾燥が多用されている。この乾燥方式は装置費用、ランニングコスト等が比較的低いが、乾燥時間は長期化する傾向にある。食品乾燥などの場合には乾燥の進行にともない内部水分の表面への移動過程が律速となり、表面と内部の含水率勾配を生じるとともに乾燥速度が徐々に低下する¹⁻²⁾。通風乾燥の場合にはこの乾燥速度の低下に起因する乾燥時間の増加を防止する技術が望まれており、これらの対策には食品内部の水分移動メカニズムの解明や乾燥時間の予測技術が不可欠となる。

最適な乾燥操作設計には、水分移動機構に基づいた乾燥機構の解明が必要であり、多くの取り組みがなされている。A. C. Jason³⁾は魚肉の通風乾燥時の乾燥時間と水分の有効拡散係数に注目し、拡散係数値の違いより減率乾燥期間を2つの段階に分類している。Del Valleら⁴⁾は塩水浸けした魚肉(メカジキ)の乾燥において、 De 値の挙動より、2つの領域に分類するとともに、拡散係数と含水率の相関式の提案を行っている。これらの研究報告例は、乾燥工程中の水分移動過程について、含水率領域でその移動機構が著しく変化する2つの領域が存在することを示唆している。

* 北見工業大学大学院博士後期課程物質工学専攻、北海道立工業技術センター研究開発部

** 北見工業大学 化学システム工学科

また通風乾燥に伴う含水率変化挙動、乾燥時間の推定の検討例として、W. A. M. McMinn⁵⁾は円柱状ポテトの乾燥について検討し、内部水分移動はFickの拡散モデルで解釈できるとし、乾燥収縮などの予測式を単純な指数方程式で解析している。D. Kannan⁶⁾は魚肉の乾燥時間の推定を拡散係数値を指数部にもつ拡散モデルを用いて検討し、限られた含水率範囲で実験値と良い一致を示した。Mittal J. L.ら⁷⁾はフランクフルトソーセージの加熱処理中の含水率分布の予測法について検討を行い、含水率分布は温度に関しArrheniusタイプの相関を示すと報告している。これらの研究報告は最適乾燥設計に多くの情報を提供するが多くの報告例は連続乾燥時のものであり、乾燥途中の乾燥情報は内部と表面部に何らかの含水率勾配が存在する場合のものである。このため、乾燥速度や拡散係数の動特性の解析には乾燥物全体(表面部と内部)での平均含水率を用いるため、含水率に的確に対応した水分移動機構の解析には不十分であった。

通風乾燥の改善操作の一手法として、乾燥操作を一旦停止し水分の内部拡散を推進し、含水率の均一化を行うあん蒸操作⁸⁾がある。このあん蒸操作後の再乾燥時は表面、内部ではほぼ均一な含水率状態から乾燥が再開される。著者らは前報⁹⁾においてあん蒸操作の最適設計を目的に、乾燥温度、あん蒸操作タイミング(あん蒸開始含水率: W_0)を変化させたときのその後の再乾燥時における乾燥挙動を乾燥速度比(R 値)と乾燥工程省時間(ST 値)を用いて解析し、これらの2つのパラメータがあん蒸操作の定量的評価に有効であること、 W_0 値に対する ST 値の大きさの違いより、あん蒸操作後の再乾燥初期の水分拡散は、領域I($W_0 > 100\% - d. b.$)とII($W_0 < 100\% - d. b.$)とで異なる拡散機構で推進する可能性を示唆した。また、あん蒸操作のような内部含水率の均一化操作後の再乾燥時解析により、広範囲な操作含水率に的確に対応する水分移動機構の解析が可能との知見を得た。

本研究では乾燥モデル物質の連続通風乾燥工程中、任意の W_0 値であん蒸操作を挿入する事により調整した、均一な内部水分分布の乾燥試料の水分の拡散係数の動特性を測定、解析し、乾燥物含水率と水分移動機構の特性化を行うとともに、乾燥操作設計の指針情報を得る目的で任意の含水率から開始した乾燥時における水分移動挙動を記述する式の導出を行った。

2. 実験方法

乾燥試料には市販の魚肉ソーセージ(T社製)を、 $\phi 20 \times L 40 \text{mm}$ の円柱状に整形したものを用いた。この試料の重量は約19gで、初期含水率(W_0)は235%-d. b.(乾量基準)であった。

実験に用いた乾燥装置の内室寸法は $W 420 \times D 430 \times H 430 \text{mm}$ であった。乾燥用空気は送風機により装置に導入され、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。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10meshのステンレス製網でできた試料皿(開口 $\phi 85 \text{mm}$ 、底面 $\phi 50 \text{mm}$ 、高さ25mm)に載せ、乾燥室内の底面より200mm上部に設置した。乾燥温度 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 $T_D = 35, 50, 70^\circ \text{C}$ を選定した。

内部含水率分布が均一である乾燥試料は、所定の含水率($W_0 = 127 \sim 49\% - d. b.$ の任意点)まで通風乾燥を行い、その後あん蒸工程を用いて調整した。あん蒸工程は表面からの水分蒸発を押さえるためにラップ(ポリエチレンフィルム)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36時間保管する方法を用いた。この時、この時間以上のあん蒸操作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。

乾燥試料の重量変化は、乾燥工程中に定期的に電子天秤(最小感度10mg)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100g に対する1時間当たりの水分減少量(g)として示した。

ここで、本実験で用いた乾燥試料及び T_D などの条件では、恒率乾燥期間中の特徴的項目である、(1)乾燥速度の一定値の過程、(2)食品内部温度測定センサーによる外表面部の温度測定において、湿球温度の一定値後の温度上昇、などの挙動は確認されないことより、本試料の場合乾燥過程が減率乾燥期間から開始しているとした。また、用いた乾燥試料(魚肉ソーセージ)はホッケ魚肉と成分組成が類似し、通風乾燥速度の経時変化挙動も酷似している¹⁰⁾理由から乾燥モデル物質として選定した。

3. 結果及び考察

3-1 内部含水率分布と乾燥速度

Fig. 1 は内部含水率分布が均一な乾燥試料から乾燥操作を開始した乾燥温度 $T_D = 35^\circ\text{C}$ の場合の乾燥速度の動特性を示したものである。Fig. 1 中の W_s 値は含水率分布が均一な試料の乾燥開始含水率を示す。 a に示す $W_s = 235\% - d. b.$ のものは試料初期含水率 (W_D) より乾燥を開始したものである。 b, c, d, e に示す試料は、試料初期含水率 (W_D) が $235\% - d. b.$ のサンプルを一旦通風乾燥させて、所定のあん蒸含水率 W_0 ($127 \sim 49\% - d. b.$ 範囲における任意の点) になった時点で乾燥操作を停止し、あん蒸工程(温度 2°C , 36時間)に移行し、内部含水率分布を平準化させた試料を再度乾燥させたときのものである。(あん蒸操作により含水率調整を行った場合、 $W_s = W_0$ となる) 乾燥開始初期は各試料ともに内部含水率分布は均一であるが、乾燥の進行に伴い表面と内部とで含水率分布に濃度勾配を生じる。例えば、Fig. 1 の W_x 点では試料 a, b とも平均含水率は約 $126\% - d. b.$ である。しかし試料 a は乾燥の進行により内部含水率に比べ表面部の含水率は低く、試料 b は乾燥開始初期のため表面-内部の含水率勾配はほとんど無い。つまり表面部に注目すると試料 a に比べ試料 b の含水率が大きな値となる。このため乾燥速度は試料 a より試料 b が大きな値を示す。しかし試料 b も乾燥の進行に伴い試料 a のような表面と内部の含水率勾配を生じ、その結果乾燥速度も試料 a の乾燥速度曲線に漸近する。この傾向は Fig. 1 の他の試料 c, d, e も同じであり、また乾燥温度を変えた $T_D = 50, 70^\circ\text{C}$ の場合にも同様な結果が得られた。この場合、試料 a の W_x 時の乾燥速度は表面あるいは内部のどの部分の含水率特性や水分移動機構を反映しているかを特定することは困難である。一方、試料 $b \sim e$ の乾燥初期の乾燥挙動はその時点の試料含水率の挙動を反映しているものと考えられる。そこで、内部含水率分布が均一である試料の乾燥初期の挙動を解析することにより、試料含水率を的確に反映した水分移動機構の解析が可能となる。

3-2 水分移動速度論

先に述べたように本乾燥サンプルの乾燥過程は、乾燥速度が含水率の減少と共に小さくなる減率乾燥期間である。この期間における水分の移動は内部水分の表面層への拡散に支配されている。その移動は以下の拡散方程式で表される¹¹⁾。

$$\frac{\partial W}{\partial t_1} = De \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 De : 水分有効拡散係数 [m^2/h], W : 任意の乾燥時間 t_1 における含水率 [%-d. b.], t_1 : 時間 [h], X : 乾燥される物体の中心からの距離 [m] である。

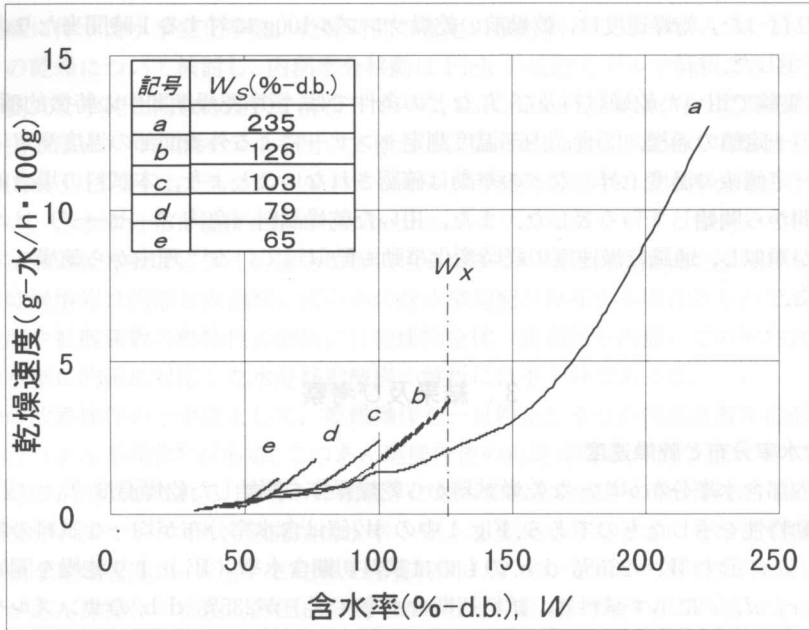


Fig. 1 内部含水率分布の均一な試料から乾燥開始した乾燥速度変化 (T_D=35°C)

本実験で用いた乾燥試料は円柱状であるため、表面積補正を行った以下の拡散方程式を用いて拡散係数値を算出した。

$$W_r = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \exp\left(-De \cdot t_1 \frac{\pi^2}{4\left(\frac{1}{2(k \cdot r)^2} + \frac{4}{h^2}\right)^{-1}}\right) \dots\dots\dots(2)$$

ここで r : 円柱の半径[m], h : 円柱の高さ[m], k : 表面積補正係数[-] (テスト試料では k = 0.816) である。

Fig. 2, 3 は T_D = 35, 70°C 時の De 値を(2)式より求め乾燥開始含水率 W_s の関数としてプロットしたものである。実線に示す含水率均一時のものは、所定の含水率まで通風乾燥した後、あん蒸操作により内部含水率の均一化を行った試料の再乾燥時初期の De 値である。(この時○で示す各測定点は、異なる試料の値である) また比較として含水率の均一化処理を行わない連続乾燥時のものを破線で示した。両曲線を比較すると、連続乾燥時のものに比べ含水率均一時の De 値は大きな値を示す。De 値の W 値に対する依存性は W_s = 100%-d.b. 近傍で大きく異なる。W_s > 100%-d.b. (領域 I) では W_s 値の増加にともない De 値の上昇を、W_s < 100%-d.b. (領域 II) では大略一定値を与え、W_s 値により De 値が著しく変化する 2 つの領域のあることが分かった。また領域 II における含水率均一時の De 値 (実線) を連続乾燥時の場合 (破線) のそれと比較すると T_D = 35, 70°C とともに連続乾燥時の約 2 倍の値を与え、この値は連続乾燥時の W = 180%-d.b. に相当する。同様な結果が T_D = 50°C においても得られた。

一般に内部含水率の均一化を行わない連続乾燥の場合には、乾燥の進行にともない表面に含水率の極端に低下した表面硬化層を形成し、この乾いた被膜が内部水分の表面への移動を阻害し乾

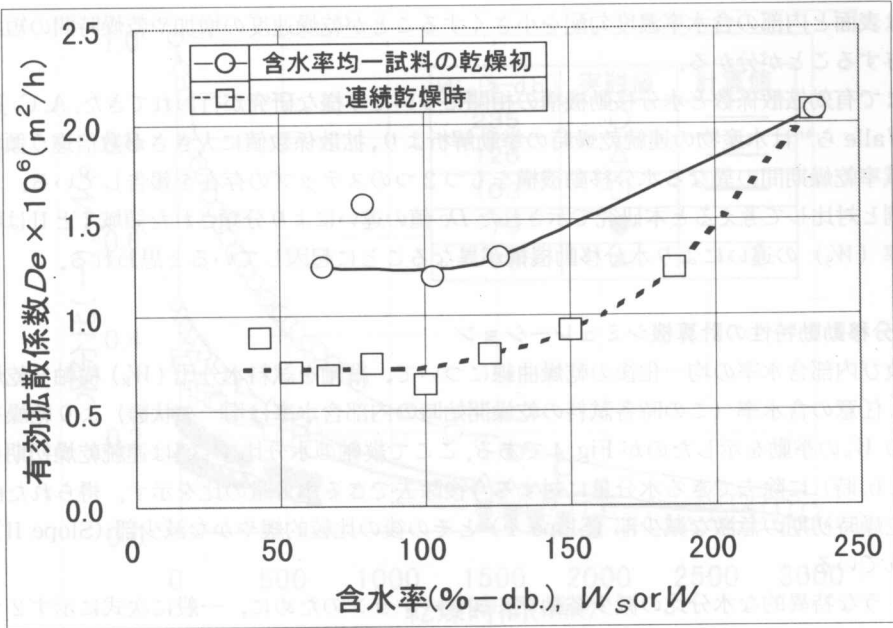


Fig. 2 含水率均一時と連続乾燥時の有効拡散係数の変化 ($T_D = 35^\circ\text{C}$)

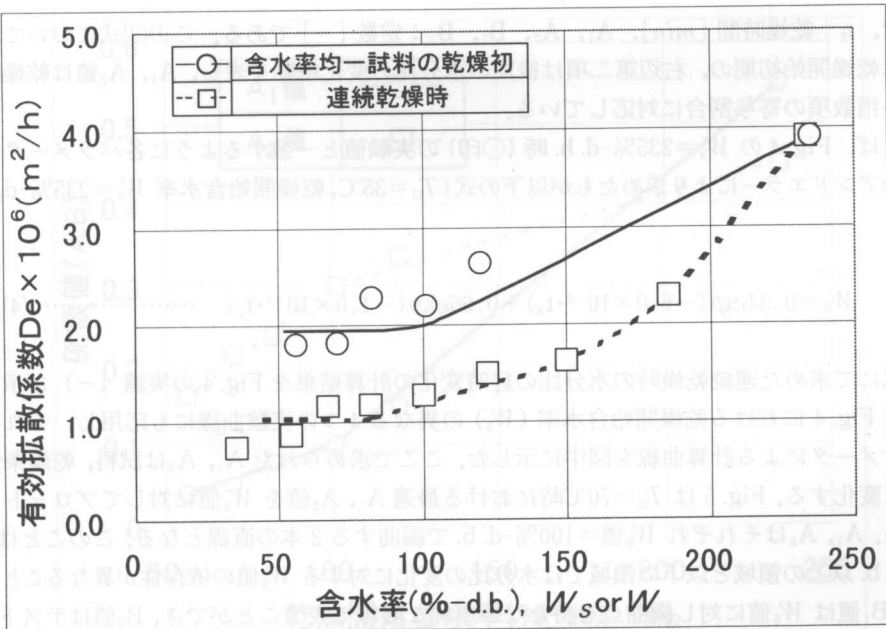


Fig. 3 含水率均一時と連続乾燥時の有効拡散係数の変化 ($T_D = 70^\circ\text{C}$)

乾燥速度を低下すると考えられている。本研究で得られた連続乾燥時の De 値の挙動と対比して考えると、水分移動の律速となる抵抗体は表面硬化層と考えられ、この表面硬化層を生成させない、あるいは表面と内部の含水率濃度勾配を小さくすることが乾燥速度の増加や乾燥時間の短縮に大きく寄与することが分かる。

これまで有効拡散係数と水分移動機構の相関について多様な研究が行われてきた。A. C. Jason³⁾ や Del Valle ら⁴⁾ は水産物の連続乾燥時の挙動解析より、拡散係数値に大きさが数倍違う領域を確認し、減率乾燥期間の異なる水分移動機構をもつ2つのステップの存在を報告している。これらの報告例と対比して考えると本研究で示された De 値の違いにより分類された領域 I と II は乾燥開始含水率 (W_s) の違いにより水分移動機構が異なることに起因していると思われる。

3-3 水分移動特性の計算機シミュレーション

連続及び内部含水率の均一化後の乾燥曲線について、縦軸を試料水分比 (W_R) 横軸を乾燥時間として、任意の含水率 (この時各試料の乾燥開始時の内部含水率は均一な状態) より乾燥を開始した時の W_R の挙動を示したのが Fig. 4 である。ここで縦軸の水分比 W_R 値は連続乾燥初期 ($W_0 = 235\% - d. b. 時$) に除去できる水分量に対する今後除去できる水分量の比を示す。得られた曲線の挙動は乾燥時初期の急激な減少部 (Slope I) とその後の比較的緩やかな減少部 (Slope II) から構成されている。

このような特異的な水分比の減少挙動シミュレーションのために、一般に次式に示す2つの指数項からなる式が提案されている。Shraf-Eldeen らはトウモロコシ粒の乾燥¹²⁾、Noomhorm らは玄米の乾燥¹³⁾、Madamba らはニンニクの乾燥¹⁴⁾などに適用し実験値とのよい整合性を得ている。

$$W_R = A_1 \exp(B_1 \cdot t_2) + A_2 \exp(B_2 \cdot t_2) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 t_2 : 乾燥時間 [min]、 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 : 定数 [-] である。この(3)式において、右辺第一項は乾燥開始初期の、右辺第二項は後期の水分比の変化挙動を表し、 A_1 、 A_2 値は乾燥開始初期時の各指数項の寄与割合に対応している。

たとえば、Fig. 4 の $W_s = 235\% - d. b. 時$ (○印) の実験値と一致するように各パラメーターをトライアルアンドエラーにより求めたものが以下の式 ($T_0 = 35^\circ C$, 乾燥開始含水率 $W_s = 235\% - d. b. 時$) となる。

$$W_R = 0.34 \exp(-6.0 \times 10^{-3} \cdot t_2) + 0.66 \exp(-1.0 \times 10^{-3} \cdot t_2) \quad \dots\dots\dots(4)$$

この式にて求めた連続乾燥時の水分比の経時変化の計算結果を Fig. 4 の実線 (—) に示す。

同様に Fig. 4 における乾燥開始含水率 (W_s) の異なる4つの実験曲線にも応用し、それぞれの最適パラメータによる計算曲線を図中に示した。ここで求められた A_1 、 A_2 は試料、乾燥条件により著しく変化する。Fig. 5 は $T_0 = 70^\circ C$ 時における最適 A_1 、 A_2 値を W_s 値に対してプロットしたものである。 A_1 、 A_2 はそれぞれ W_s 値 = 100% - d. b. で編曲する2本の直線となる。このことは $W_s = 100\% - d. b.$ 以上の領域と以下の領域では水分比の変化に対する W_s 値の依存性が異なることを示している。 B_1 値は W_s 値に対し編曲点を持たない単純な直線で表すことができ、 B_2 値はテスト W_s 値の範囲でほぼ一定の値を示した。

$W_s = 100\% - d. b.$ を基準に2つの領域に分類することにより、あん蒸操作後の再乾燥時の水分比

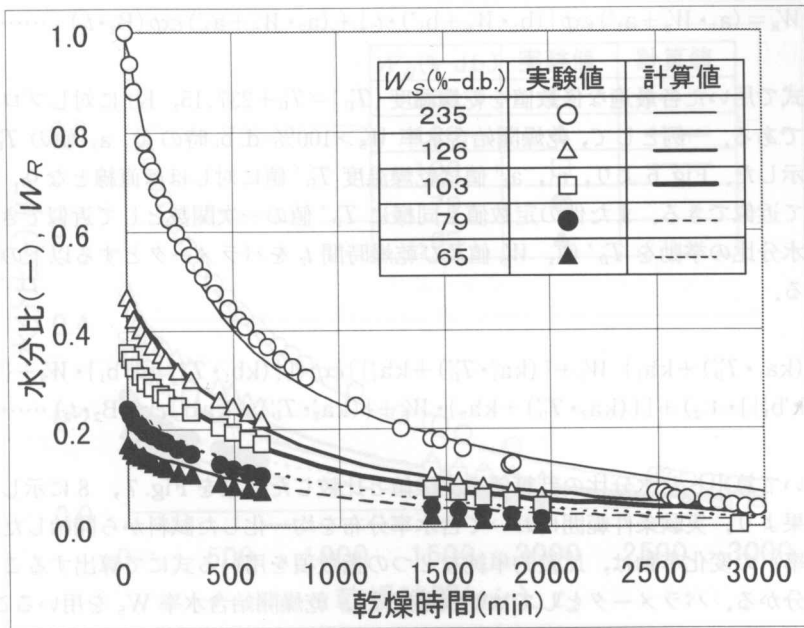


Fig. 4 乾燥特性(水分比)経時変化の実験値と計算値の比較 ($T_b = 35^\circ\text{C}$)

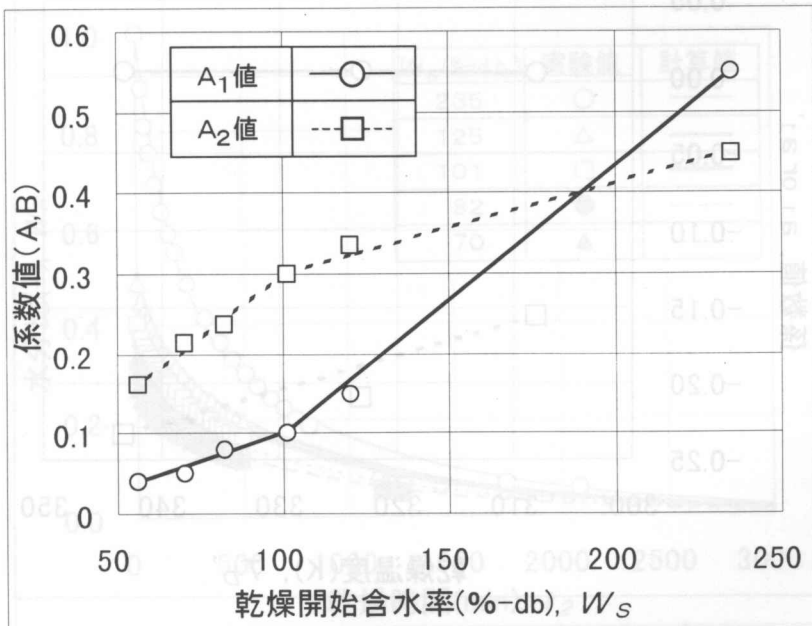


Fig. 5 W_n 式中の係数值(A_1 , A_2)の乾燥開始含水率(W_s)依存性 ($T_b = 70^\circ\text{C}$)

の挙動は、(9)式に示す W_s 値をパラメータに含む関数にて表すことができる。

$$W_R = (a_1 \cdot W_s + a_1') \exp\{(b_1 \cdot W_s + b_1') \cdot t_2\} + (a_2 \cdot W_s + a_2') \exp(B_2 \cdot t_2) \dots\dots\dots(5)$$

更に、(5)式で用いた各最適な係数値を乾燥温度 ($T_D' = T_D + 237.15, K$) に対しプロットしたものが Fig. 6 である。一例として、乾燥開始含水率 $W_s > 100\% - d. b.$ 時の a_1, a_1' 値の T_D' 値に対する依存性を示した。Fig. 6 より、 a_1, a_1' 値は乾燥温度 T_D' 値に対しほぼ直線となり、 T_D' 値の一次関数として近似できる。また他の定数値も同様に T_D' 値の一次関数として近似できる。これらの結果より水分比の挙動を T_D' 値、 W_s 値及び乾燥時間 t_2 をパラメータとする以下の(6)式で表すことができる。

$$W_R = \{ \{ (ka_1 \cdot T_D') + ka_1' \} W_s + \{ (ka_1' \cdot T_D') + ka_1' \} \} \exp(\{ \{ (kb_1 \cdot T_D') + kb_1' \} \cdot W_s + \{ (kb_1' \cdot T_D') + kb_1' \} \} \cdot t_2) + \{ \{ (ka_2 \cdot T_D') + ka_2' \} \cdot W_s + \{ (ka_2' \cdot T_D') + ka_2' \} \} \exp(B_2 \cdot t_2) \dots\dots\dots(6)$$

(6)式を用いて算出した水分比の計算値を実験値と比較した結果を Fig. 7, 8 に示した。

以上の結果より、実験条件範囲において含水率分布を均一化した試料から開始した乾燥時の水分比(含水率)の変化挙動は、比較的単純な2つの指数項を用いる式にて算出することが可能であることが分かる。パラメータとしては乾燥温度 T_D 、乾燥開始含水率 W_s を用いることにより、種々の条件(任意の T_D, W_s)での乾燥速度、乾燥時間などの推定が可能であり、乾燥操作の最適設計化の有効な情報を得ることができる。

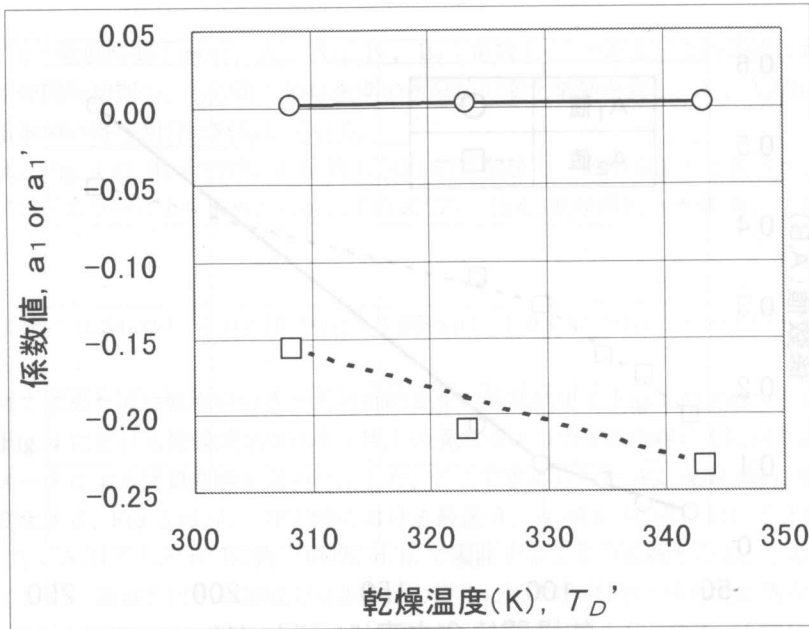


Fig. 6 最適決定された W_R 式中の係数値 (a_1, a_1') の乾燥温度 (T_D') 依存性 ($W_s > 100\% - d. b.$, O : a_1 値, \square : a_1' 値)

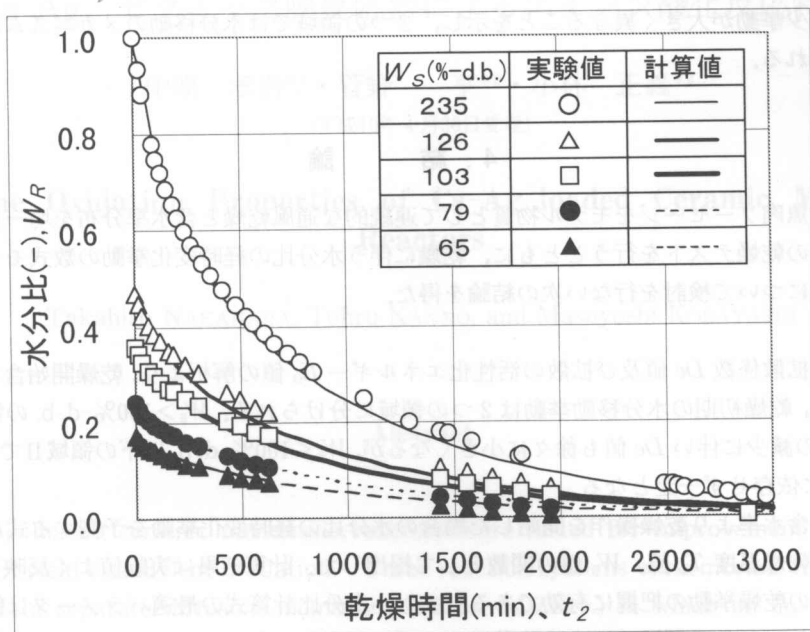


Fig. 7 W_s , T_0 値を変数として計算した水分比の実験値との比較 ($T_0 = 35^\circ\text{C}$)

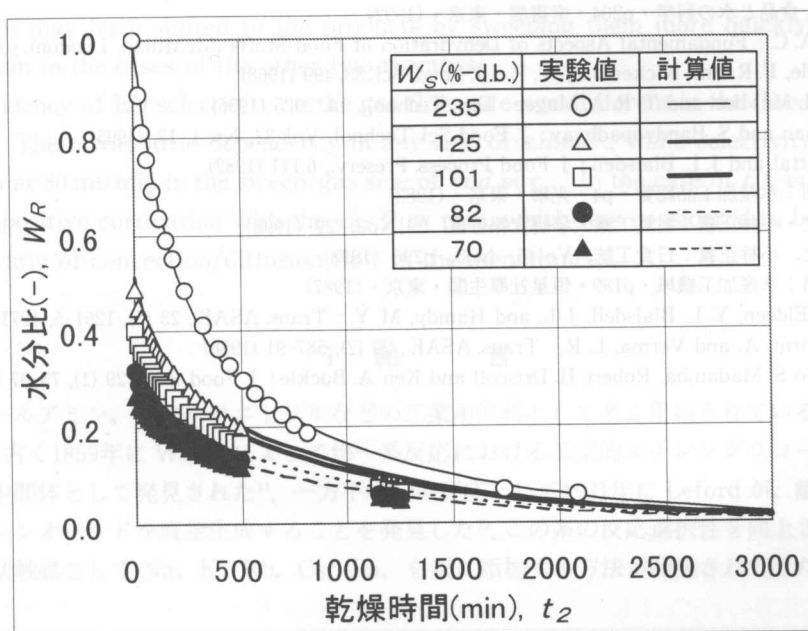


Fig. 8 W_s , T_0 値を変数として計算した水分比の実験値との比較 ($T_0 = 70^\circ\text{C}$)

また、最適決定された各係数値はのうち(3)式の A_1 , A_2 の各係数値は $W_s = 100\% - d. b.$ 以上あるいは以下の2つの領域で W_s に対する依存性大きく異なる。このことは、2つの領域で再乾燥時の水分比の減少挙動が大きく異なることを示し、2つの領域では水分移動のメカニズムが異なることが推察される。

4. 結 論

円柱状の魚肉ソーセージをモデル物質として連続的な通風乾燥と含水率分布を均一化した任意含水率試料の乾燥テストを行うとともに、乾燥に伴う水分比の経時変化挙動の数式モデルと拡散係数の挙動について検討を行ない次の結論を得た。

- (1) 水分の拡散係数 De 値及び拡散の活性化エネルギー E_0 値の解析より、乾燥開始含水率 W_s 値により、乾燥初期の水分移動挙動は2つの領域に分けられる。 $W_s > 100\% - d. b.$ の領域 I では W_s 値の減少に伴い De 値も徐々に小さくなるが、 $W_s < 100\% - d. b.$ 以下の領域 II では De 値は W_s 値に依存せず一定となる。
- (2) 任意な含水率より乾燥操作を開始した場合の水分比の経時変化挙動を予測する式を操作条件である乾燥温度 T_D 値、 W_s 値の関数として提出した。計算結果は実験値よく反映し、異なる条件での乾燥挙動の把握に有効である。また、水分比計算式の最適パラメータは領域 I, II で異なり、これら領域では水分移動メカニズムが異なると考えた。

参 考 文 献

- 1) Lazan, M. E. and Farkas, D. F.: J. Food sci., 36, 315 (1971)
- 2) 野口駿: 食品と水の科学・p204・幸書房・東京・(1992)
- 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 (1968)
- 5) W. A. M. McMinn and T. R. A. Magee: Dry. Technol., 14, 2025 (1996)
- 6) D. Kannan and S. Bandyopadhyay: J. Food Sci Technol, Vol. 32, No. 1, 13, (1995)
- 7) G. S. Mittal and J. L. Blaisdell: J. Food Process. Preserv., 6, 111 (1982)
- 8) 三輪勝利: 水産加工品総覧・p4・光琳・東京・(1983)
- 9) 小西靖之・小林正義: 北見工業大学研究報告書, 29, No2, 29 (1998)
- 10) 小西靖之, 小林正義: 日食工誌, Vol45, No5, p296 (1998)
- 11) 室谷幸男: 水産加工機械・p189・恒星社厚生閣・東京・(1987)
- 12) Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J. L. and Hamdy, M. Y.: Trans. ASAE., 23 (5), 1261-5, 1271 (1980)
- 13) Noomhorm, A. and Verma, L. R.: Trans. ASAE., 29 (2), 587-91 (1986)
- 14) Ponciano S. Madamba, Robert H. Driscoll and Ken A. Buckle: J. Food Eng., 29 (1), 75-97 (1996)