

# 相対湿度動的制御による農水産物の品質制御通風乾燥操作設計 — 乾燥イカ・長ネギの風味、製品色、細菌増殖制御の設計 —

小西靖之、木戸口恵都子、小林正義\*、熊林義晃\*\*、川合 祐史\*\*\*

## Drying Operation Design of the Agriculture and Fisheries Products Due to the Dynamic Control of Relative Humidity in Drying Air - Requested Design of the Color, Taste, and Bacterial Count Controlling using Dried Squid and Leek-

Yasuyuki Konishi, Etuko Kidoguchi, Masayoshi Kobayashi\*,  
Yoshiteru Kumabayashi\*\*, and Yuji Kawai\*\*\*

### 要 旨

本研究では、乾燥する食材例として水産物（イカ）、農産物（長ネギ）をとりあげ、それらの乾燥工程中の水分状態と乾燥条件（特に乾燥空気の相対湿度）の最適設計に注目した。特に微生物増殖制御及び香味野菜乾燥制御における最適化のために、乾燥空気の相対湿度因子 (RH) をパラメータとした食材の菌体数、製品色・風味設計を行い、この時引き起こされる物理化学的、生物学的ダイナミズムを定量的に評価した。

水産物（イカ）乾燥工程の一般細菌数への影響については、水分種領域 I（含水率120%-d.b. 以上）は  $RH > 65\%$  では、RH の増加に伴い細菌増殖を加速させ、 $RH < 65\%$  ではそれを停止させる。領域 II（含水率120%-d.b. 以下）は  $RH > 65\%$  でも細菌増殖を停止させることを明らかにした。こうして乾燥空気の相対湿度をコントロールすることにより、一般細菌の増殖抑制や乾燥速度制御出来ることを明らかにした。

農産物（長ネギ）では乾燥工程中の製品色の変化を簡単な逐次反応モデル  $A \rightarrow B \rightarrow C$  を用い、褐変変化の定量的な解析を行い、逐次反応速度定数 ( $k_a, k_b$ ) は RH により設計ができ、風味に影響を与える中間体最大濃度と味覚との間に強い相関性があること、RH 制御により風味と製品色の両特性を良好化出来る非定常乾燥操作の設計ができることを明らかにした。

### 1. 緒 言

地域の農水産物の高付加価値化には、その素材の機能性の評価や新たな食品の開発、品質の向上などの様々な取り組みがなされている。その一つ

の取り組みとして、地域素材の乾燥加工及び食製品への利活用が盛んに行われている。しかし、乾燥食材製品の良し悪しは、食材から水分を取り除く乾燥操作技術の高低に敏感に依存する。その乾

\* 寒地資源高度利用研究所 所長

\*\* 北海道立総合研究機構 食品加工研究センター 食品工学部 研究主幹

\*\*\* 北海道大学大学院水産科学研究院 水産食品科学分野 教授

責任著者連絡先 (Yasuyuki Konishi) : konishi@techakodate.or.jp

乾燥工程における脱水操作時に起こる食品風味や製品色変化、形状変化、細菌増殖など、様々な変化に対応した最適制御を考慮しなければならない。こうした食品乾燥操作の高度な設計のためには、乾燥工程中にダイナミックに変化する食品中の水分の状態を定量的に評価し、その結果に基づいた動的環境（温度、湿度など）制御が重要となる。<sup>1-7)</sup>

周知のように動的環境の一つである乾燥空気相対湿度は実乾燥工程中の測定が難しいこともあり、あまり重要視されていない。しかしこの相対湿度は乾燥空気の温度と同様、場合によっては温度以上の品質影響因子となる。たとえば微生物増殖については、その速度因子への効果は経験的に極めて重要な因子であることを知っている。<sup>8)</sup> 更に食品特有の褐変反応への効果についても、日常の食品保存過程の経験で既知の事実として認識されている。<sup>9)</sup>

本研究ではこの相対湿度の乾燥製品への品質的な影響を検討するために、農産素材の乾燥例として長ネギ通風乾燥の製品色や香味乾燥に対する乾燥空気相対湿度の影響、水産素材の乾燥例としてイカの通風乾燥工程での製品の細菌増殖に対する乾燥空気相対湿度の影響、について定量的に評価し、乾燥工程における湿度制御の重要性を示しその最適操作設計することを目的としている。ここから本文です。

## 2. 実験方法

### 2.1. 乾燥試料

#### (1) イカ試料

北海道産真イカの冷凍品を解凍後、外套膜部（厚み6~8mm）を50×50mmに整形して用いた。この試料の初期含水率（ $W_D$ ）は300~340%-d.b.（乾量基準含水率）であった。尚、本試料の乾燥工程は脱水速度の測定結果より、減率乾燥期間より開始することを予め確認した。

#### (2) 長ネギ試料

市販の長ネギを乾燥テストに用いた。洗浄後約2mmの厚みで小口切りにしたものを乾燥原料試料とした。この試料の $W_D$ は1000~1800%-d.b.であった。乾燥工程中の製品色変化測定には測定データの安定性確保のために、茎部（白色の部分）

のみを用いた。

### 2.2. 乾燥条件

#### (1) イカ試料

乾燥テスト乾燥温度（ $T_D$ ）40~60℃の所定条件にて行った。乾燥工程途中に試料内部の含水率均一化を目的に挿入したあん蒸工程（PUP）は、予め庫内温度を2℃（±0.5℃）に制御してあるインキュベーターの中にイカ試料を保管する方法を用いた。尚、PUPは36hとしこれ以上のPUP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認した。PUPの開始含水率（ $W_0$ ）範囲は $W_0 = 7 \sim 280\% \text{-d.b.}$ とした。PUP工程中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。PUP後の再乾燥工程は、PUP前の乾燥工程と同条件にて行った。

#### (2) 長ネギ試料

乾燥工程は $T_D = 40 \sim 80^\circ\text{C}$ 、相対湿度（RH）20~60%の条件で行った。乾燥工程中、乾燥試料はステンレス製の乾燥網（175×175×40mm）に入れ乾燥テストを行った。

### 2.3. 含水率の測定

乾燥工程中の含水率（ $W$ ）変化挙動の測定のために、乾燥試料は微少加重ロードセル（LVS-50GA又はLVS-500GA（（株）共和電業）に吊下げた試料皿に静置し、乾燥工程中の試料重量変化を微少ロードセルの出力をデータロガー（NR-1000（（株）キーエンス））により連続的に測定した。乾燥前及び乾燥終了後の含水率は105℃絶乾法により測定した。含水率は無水材料（絶乾固体）の重量を基準とし、 $W$ （又は $W_0$ ）（%-d.b.）=（水分重量）/（絶乾固体重量）×100として示した。

### 2.4. 生菌数測定

イカ試料の生菌数変化挙動は、予め清水で洗浄し生菌数を約 $1.7 \times 10^2$  CFU/gに整えた試料を用いて所定の条件で乾燥したサンプルを、Tryptone Soya Agar (Oxoid) を用いた混釈平板培養法（30℃ -48h）で生菌数を測定した。

### 2.5. 色彩測定

乾燥工程中、所定の乾燥時間ごとに長ネギ乾燥

試料の色彩の測定を行った。測定にはミノルタ製色彩計 CR-400a を使い、 $L^*a^*b^*$  表色系を用いた。明度  $L^*$  (0 ~ 100) は明るさで数値が小さくなると黒方向を、大きくなると白方向であることを示す。 $a^*$ 、 $b^*$  は色相と彩度を示しており、 $a^*$  (-60 ~ 60) はマイナス方向が緑、プラス方向が赤を示し、 $b^*$  (-60 ~ 60) はマイナス方向が青、プラス方向が黄方向を示している。数値が大きいほど色が鮮やかになることを示す。得られた  $L^*a^*b^*$  を用い、(1) より色差  $\Delta E^*$  を算出した。

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \dots(1)$$

## 2.6. 風味評価

長ネギ乾燥製品の風味評価は、官能法及びセンサー法で評価した。長ネギ乾燥品は、6.5倍に希釈した市販めんつゆ (80g) に所定量 (1.5g) をいれて評価サンプルとした。センサー法では、味覚センサー TS-5000Z (Intelligent Sensor Technology, Inc 製) を用いた。

## 3. 実験結果及び考察

### 3-1. イカの乾燥工程での乾燥空気相対湿度制御の効果

イカなどの水産物の乾燥工程では、乾燥原料の殺菌工程などがいないため、乾燥工程中での細菌増殖抑制が求められる。

#### 3-1-1. 乾燥空気湿度の脱水応答曲線と細菌増殖応答曲線への影響

乾燥工程中に相対湿度を変えて脱水挙動・細菌増殖挙動を調べた結果が図1である。乾燥温度 ( $T_D$ ) 40°C で、相対湿度 (RH) が比較的高い RH = 85% の場合は、図1-(A) の (a) の示すようにゆっくりとした乾燥挙動を示し、相対湿度を下げる (b) → (c) → … と、乾燥挙動も早くなる。このときの一般細菌数の増加挙動を調べた結果が図1-(B) で、RH が高い場合には乾燥工程中に細菌が著しく増殖するが、RH を下げることにより、その増殖が抑制され、RH = 30% の低湿度条件で乾燥する、一般細菌数はほとんど増殖しない。

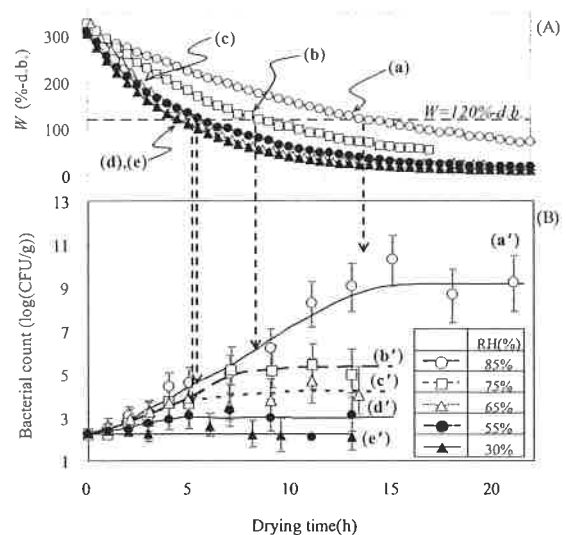


図1 相対湿度の異なる乾燥条件の脱水挙動と一般細菌の増殖挙動 ( $T_D=40^\circ\text{C}$ )

#### 3-1-2. 細菌増殖菌体数への乾燥空気湿度 (RH) と増殖温度の影響

この増殖挙動の RH 依存性を評価するために、異なる温度 ( $T_D = 30, 40, 50^\circ\text{C}$ )、湿度 (RH = 55, 65, 75, 85%) の乾燥開始4h 後の細菌数を比較して整理した結果が図2である。乾燥開始後4時間後のイカの細菌数は、RH = 55% の場合は  $10^2$  CFU/g であるが、相対湿度が高くなるに従い、明らかに増加し、RH = 85% では  $10^{4-5}$  CFU/g となる。一方、乾燥温度の違いにはばらつきがあるが、その影響は小さい。この様に、イカの乾燥工程での細菌数増殖は、乾燥空気の相対湿度に強く影響を受ける。

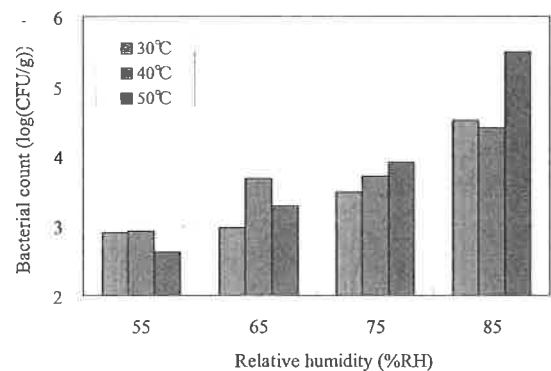


図2 異なる乾燥条件でのイカ乾燥工程中の一般細菌 ( $t = 4\text{h}$ )

#### 3-1-3. 乾燥空気湿度関数としての細菌増殖

図1-(B) の乾燥工程中の細菌増殖挙動は、乾燥開始後より細菌数は増加するが、その後細菌数が一定値となり細菌増殖が停止する。この細菌増殖

が停止する乾燥時間は、乾燥空気 RH の違いにより異なり、そのときの一般細菌数も異なることが分かった。そこで、図1の一般細菌の増加挙動をイカの含水率 (W) に対して整理した結果が図3である。ここで横軸の右から左に向かって乾燥が進行していることを示す。○のプロットで示した RH = 85% の場合、一般細菌数は W > 120%-d.b.(領域 I、水分種 -A<sub>1</sub>) では徐々に(横軸左へ移動)増加するが、W = 120~140 %-d.b. の時点で細菌数の増加は停止し、その後 W < 120%-d.b.(領域 II、水分種 -A<sub>2</sub>) では一定細菌数となる(増殖しない)。乾燥が進行した領域 II での細菌数は、全ての乾燥空気 RH について一定値を与えるが、RH の低い場合ほど小さな値を与える。この結果は、水分種 -A<sub>1</sub> の領域 I では一般細菌増殖が起こるが、その増殖の大きさは RH により制御出来ることを示している。

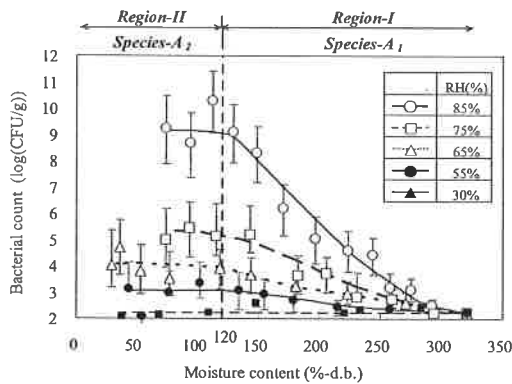


図3 一般細菌数増殖に対する乾燥空気相対湿度と含水率の影響 (T<sub>0</sub>=40°C)

### 3-1-4. 細菌増殖速度論

乾燥空気 RH の細菌増殖挙動を定量的に評価するために、W<sub>0</sub> > 120%-d.b. の対数増殖期間の菌体増殖係数を (2) 式より算出した。

$$m = \left( \frac{1}{t - t_0} \right) \times (\ln N - \ln N_0) \quad \dots(2)$$

ここで、m: 菌体増殖係数[h<sup>-1</sup>], N<sub>0</sub>: 乾燥開始時(t<sub>0</sub>)の菌体数[-], N: 乾燥時間 t の菌体数[-], t 及び t<sub>0</sub>: 乾燥時間[h]、である。

菌体増殖係数 (m) は対数増殖期間における菌体増殖速度の指標であり、所定の乾燥条件における一般細菌数の増殖の起こりやすさを示している。T<sub>D</sub> = 40°C で RH の異なる条件でイカ乾燥を行っ

た場合の m を RH に対しプロットし図4に示した。RH = 30% では m = 0 を与えこの乾燥条件では細菌増殖をほぼ抑制できるが、RH の増加に伴い m は大きな値を与えた。このことは、細菌増殖を促進させる水分種 A<sub>1</sub> 領域 (W > 120% -d.b. の高含水率領域) でも、RH を制御することより、増殖速度を抑制出来ることを再度示している。

この様にイカの乾燥工程では、乾燥空気の相対湿度が乾燥工程中の細菌増殖に強く影響する。

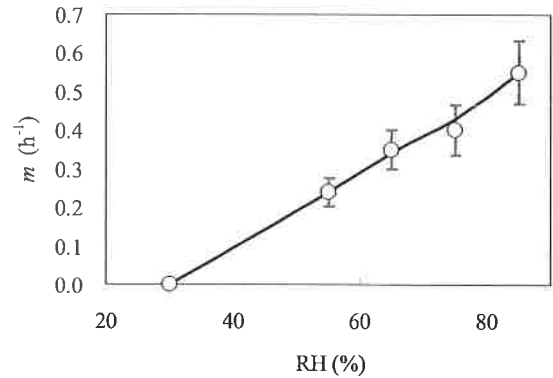


図4 菌体増殖係数 (m) の乾燥空気相対湿度の依存性 (T<sub>D</sub>=40°C)

### 3-2. 長ネギ乾燥工程での乾燥空気相対湿度制御の効果

長ネギなどの農産物乾燥品では製品色と風味が品質面の重要な因子である。食品乾燥工程では、脱水の進行とともに、食材中では図5に示すメイラード反応 (非酵素的褐変反応) が進行し、製品色変化 (褐変反応) が起こるとともに風味変化も同時に起こる。このメイラード反応において、反応中間体の積分量が乾燥製品の風味に影響すると言われている。また、食品の乾燥工程では乾燥空気の温度や相対湿度がこのメイラード反応には強く影響を与える。<sup>10-13)</sup>

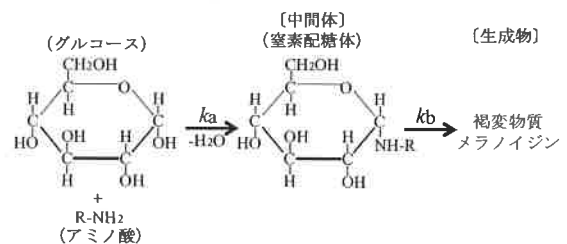
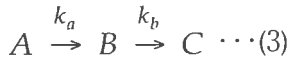


図5 褐変反応経路モデル

そこで本研究では、長ネギの褐変反応が図5に示した反応モデルで進行するとして、(3) 式に示

す逐次反応モデルを用いて、乾燥工程中の相対湿度の反応中間体積分量への影響、反応中間体積分量の風味への影響を検討した。



3-2-1. 脱水応答曲線のシミュレーション

メイラード反応への乾燥空気の相対湿度の影響を評価するため  $T_D = 40^\circ\text{C}$  で異なる相対湿度 (RH) で長ネギ乾燥を行った時の脱水応答 (2) 式の A 成分減少応答) を図6のプロットで示した A 成分減少応答は明らかに RH の影響を受ける。(3) 式の A 成分減少応答を脱水応答に対応させ、(4) 式を用いて速度定数  $k_a$  を算出した。

$$C_A = C_{A0} \cdot \exp(-k_a \cdot t) \cdots (4)$$

ここで、 $C_A$  は A 成分の濃度、 $C_{A0}$  は A 成分の初期濃度、 $k_a$  ( $\text{h}^{-1}$ ) は反応速度定数、 $t$  (h) は反応時間である。この結果より A 成分の減少速度定数  $k_a$  を算出した。算出した  $k_a$  ( $\text{h}^{-1}$ ) は図中に示した。

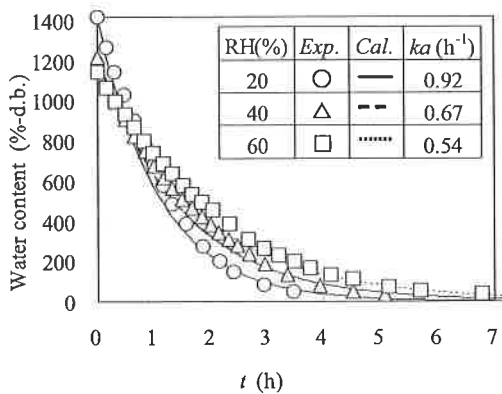


図6 長ネギ乾燥工程中の脱水応答挙動 ( $T_D=40^\circ\text{C}$ ) と計算値比較

3-2-2. メイラード反応中間体及び最終生成物応答曲線のシミュレーション

異なる RH 条件でのネギ乾燥工程中のメイラード反応において、 $k_a$  は図6の RH 依存性より、 $k_b$  は色差  $\Delta E^*$  の応答曲線に合致するように求め、反応中間体量の経時変化をシミュレーションした。ここで、反応中間体、中間体 B 成分と褐変最終物質 C 成分の反応モデルは以下の式で表される。

$$C_B = C_{A0} \cdot \left( \frac{k_a}{k_b - k_a} \right) \cdot (\exp(-k_a \cdot t) - \exp(-k_b \cdot t)) \cdots (5)$$

$$C_C = C_{A0} - C_{A0} \left[ \left( \frac{k_b}{k_b - k_a} \right) \cdot \exp(-k_a \cdot t) \right] - C_{A0} \left[ \left( \frac{k_a}{k_a - k_b} \right) \cdot \exp(-k_b \cdot t) \right] \cdots (6)$$

ここで、 $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$  は A ~ C 成分の濃度、 $k_a$ ,  $k_b$  は各ステップの反応速度定数である。

異なる RH 条件での長ネギ乾燥工程中の中間体 B 成分濃度の動特性について式 (5) を用いて算出した結果が図7である。図7より明らかなように、中間体  $C_B$  の応答曲線は RH の影響を受け、大きな RH ほど中間体の生成・消失がゆっくり進行することが分かる。また図7の図上積分より中間体  $C_B$  の積分量 (=  $C_{Bin}$ ) を算出した。

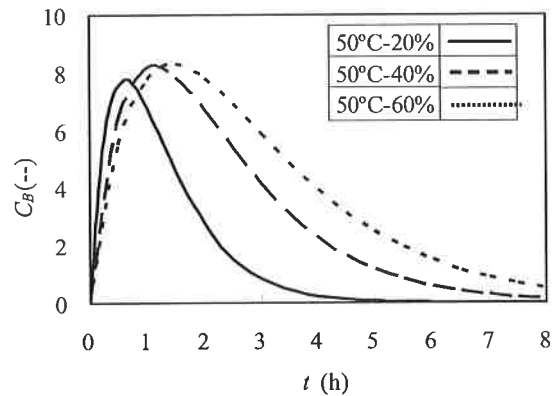


図7 中間体量の RH 依存性

3-2-3. 反応中間体量の乾燥空気湿度依存性

長ネギの通風乾燥時の中間体積分量  $C_{Bin}$  は RH 及び  $T_D$  に強く影響を受ける。図7の図上積分より算出した  $C_{Bin}$  を用い、RH 及び  $T_D$  に対し整理した結果が図8である。 $C_{Bin}$  値は、 $T_D$  が低いほど、RH は高い条件ほど大きい。前述したように反応中間体は香味成分と関連した物質と言われている。このことは  $C_{Bin}$  が乾燥製品風味と関連していることを強く示している。

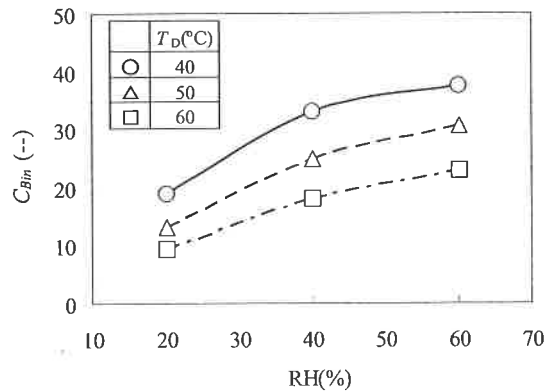


図8 中間体積分量の RH,  $T_D$  依存性

### 3-2-4. 味覚センサーによる評価と風味設計

そこで、求められた  $C_{Bin}$  と乾燥製品の風味との相関性を評価した。乾燥製品の風味評価には味覚センサーを用い、旨みの味覚センサースコア値に対する  $C_{Bin}$  をプロットしたのが図9である。スコア値は、大きな値ほど香味が高いことを示している。図9はバラツキが大きい、 $C_{Bin}$  が増加すると味覚センサースコア値が高くなることが示された。このことは、長ネギ乾燥工程中の RH 条件により  $C_{Bin}$  値を制御出来、その  $C_{Bin}$  値が高い条件設定を行うことにより、風味を向上できることを示している。こうして、RH 制御により風味設計が可能となる。

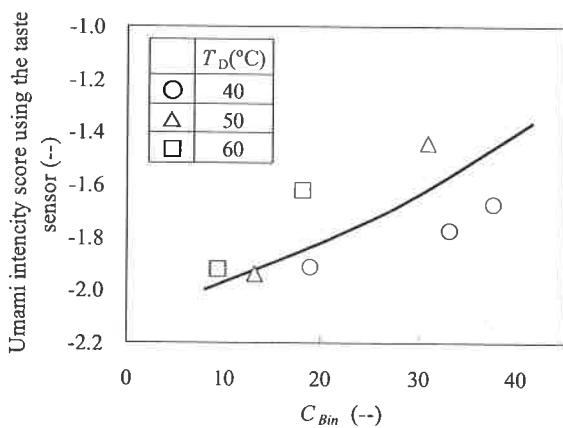


図9 中間体量の味覚センサースコア

## 4. 結 論

食品の乾燥工程では、乾燥空気の相対湿度が乾燥製品への品質面に強く影響し、高品質な乾燥製品の設計には、この相対湿度の最適制御が重要である。

### 4.1. 乾燥イカ製品設計について次の結論を得た

具体的制御パラメータとして、微生物学的な視点及び色彩学的視点を探り上げ、それらとプロトンNMR法により得られた水分種のダイナミズムとを結びつけ次のような定量的評価を得た。

- (1) 乾燥工程中一般細菌数の増殖は、乾燥用空気の相対湿度に強く影響を受け、乾燥温度 ( $T_D = 30 \sim 50^\circ \text{C}$ ) の影響は小さい。一般細菌数は高湿度条件 (85%RH) では急激に増加するが、低湿度条件 (65%RH 以下) では、ある程度抑制できる。
- (2) 水分種  $-A_1$  (領域 I) は一般細菌数を増殖させる

が、水分種  $-A_2$  (領域 II) は増殖を抑制する。

- (3) 菌体増殖係数 ( $m$ ) は、RH = 65% 以下では一定値を与えるが、RH = 65% 以上では RH の増加に伴い  $m$  値も増加する。従って RH = 65% 以下に制御することにより、細菌増殖速度を低下できる。

### 4.2. 長ネギの脱水反応の速度解析から次の結論を得た。

- (1) 長ネギ乾燥工程の褐変反応を脱水及び製品色変化データと3成分からなる逐次反応モデルを用いて解析し、速度定数  $k_a$  及び  $k_b$  を算出した。速度定数  $k_a$  値及び  $k_b$  値は乾燥空気の相対湿度に依存する。
- (2)  $k_a$  及び  $k_b$  を用いて算出した反応中間体量も相対湿度に依存し、その反応中間体量と味覚センサースコア値は正の相関性が確認された。
- (3) 長ネギ乾燥工程中の RH 条件により  $C_{Bin}$  値を制御出来、その  $C_{Bin}$  値が高い条件設定を行うことにより、風味を向上できることを示している。こうして、RH 制御により風味設計ができることを明らかにした。

## 文 献

- 1) Konishi, Y., Horiuchi, J. & Kobayashi, M. Optimal design of a poultice-up process operation in food drying process developed for keeping good quality of foods. Proceedings of Euro Food Chem X, (1999), pp.744-751.
- 2) Konishi, Y., Horiuchi, J. & Kobayashi, M. Dynamic evaluation of the dehydration response curves of foods characterized by a poultice-up process using a fish-paste sausage.(I. Determination of the mechanism for moisture transfer). Drying Technology, 19, (2001), 1253-1270.
- 3) Konishi, Y., Horiuchi, J. & Kobayashi, M. Dynamic evaluation of the dehydration response curves of foods characterized by a poultice-up process using a fish-paste sausage.(II. A new tank model for a computer simulation). Drying Technology, 19, (2001), 1271-1285.
- 4) Konishi, Y. & Kobayashi, M. Quantitative

- evaluation of the design parameters requested in beef and pork drying operation, AIDIC Conference Series, Vol.9 (2009) , PP177-186.
- 5)Konishi, Y. & Kobayashi, M. Challenge to the food engineering due to a hybrid method of chemical engineering-proton NMR technique - Meat jerky design by the scientific parameters, Chemical Engineering Transaction, 20, (2010), 217-222.
- 6)Konishi, Y. & Kobayashi, M., Advances in Chemical Engineering, Ed. Z. Nawaz and S. Naveed., published by InTech, Rijeka, (2012), PP69-92.
- 7)Konishi, Y. & Kobayashi, M. Advantage of the hybrid method of chemical engineering - Proton NMR technique for food engineering, Food Science and Technology Research, 19, (2013), 717-727.
- 8)Konishi, Y., Kobayashi, M. & Kawai, Y. Bacterial growth trend of a dried Japanese common squid (*Todarodes pacificus* Steenstrup) characterised by dehydration. International Journal of Food Science and Technology, 46, (2011), 2035-2041.
- 9)Konishi, Y. & Kobayashi, M. The new evidences driver from a consecutive reaction model for the maillard reaction, Chemical Engineering Transaction, 27, (2012), 307-312.
- 10)Labuza, T.P., Interpreting the complexity of the kinetics of the Maillard reaction, In "The Maillard Reaction in Food, Nutrition and Health" Labuza,T.P., Reineccuis,G.A., Baynes,J., and Monnier (eds), Royal Society of Chemistry,London, (1994), pp177-181
- 11)Hurrell, R.F. Influence of the Maillard reaction on the nutritional value of foods. In "The Maillard Reaction in Food Processing, Human Nutrition and Physiology" , Finot, P.A., Aeschbacher, H.U., Hurrell, R.F. & Liardon, R. (eds), Birkhäuser Verlag, Basel, (1990), pp. 245-258.
- 12)Baltes,W., Kunert-Kirchoff,J. & Reese, G., "Model reactions on generation of thermal aroma compounds, In "Thermal Generation of Aroma", Paliament, T.H., Ho, C.-T. and McGorrin, R.J (eds), American Chemical Society, Washington, D.C., (1989), pp. 143-155.
- 13)Eichner, K. & Wolf, W. Maillard reaction products as indicator compounds for optimizing drying and strage conditions. In "Maillard reaction in Foods and Nutrition" , Waller,G.R. & Feather, M.S.(eds), American Chemical Society, Washington, D.C., (1983), pp. 317-333.