

# ジャーキー乾燥工程における物理化学パラメータ動特性を用いた 複合水分種の分離

小西靖之、小林正義\*

## Discrimination of multifunctional water species by using the dynamic behavior of physicochemical parameters in a drying process of pork-jerky

Yasuyuki Konishi and Masayoshi Kobayashi\*

### 要 旨

ポークジャーキー乾燥工程中の複合水分種の分離や脱水特性に影響を与える脂質及びジャーキー構造の影響を物理化学パラメータの動特性評価により行った。脱水特性を支配している水分の有効拡散係数( $De$ )は乾燥工程中の含水率( $W_0$ )に依存して異なり、その挙動は2つの領域に分離される。 $T_D=60^\circ\text{C}$ では、領域I( $W_0 > 120\%-\text{d.b.}$ )では $W_0$ に依存せず $De$ は $4.8 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ の一定値を与えるが、領域II( $W_0 < 120\%-\text{d.b.}$ )では $De$ は $4.4 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ から $1.3 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ へと低下する。領域IとIIでは水分拡散の動特性は著しく異なり、水分移動機構も大きく異なる。TPDプロファイルでは、脱水温度の異なる2つのピーク(Peak- $\alpha$ と $\beta$ )が観測され、高温側ピークのPeak- $\beta$ の脱水ピーク温度(TP)は $W_0$ の低下に伴い領域Iでは $110^\circ\text{C}$ であるが、領域IIでは $110^\circ\text{C}$ から $140^\circ\text{C}$ へと急激に増加する。

脂質量による複合水分種脱水ダイナミズムへの影響は、異なる脂質割合試料の $De$ 動特性により評価し、4~6%のLipid Ratioではほぼ一定の $De$ を与えるが、Lipid Ratioが6%以上ではその増加に伴い、 $De$ は減少する。脂質割合は水分種の吸着状態及び水分移動機構に強い影響を与える。ポークジャーキーの構造変化は水分有効拡散係数( $E_D$ )及び空隙率( $V_f$ )に反映し、水分移動機構は低 $V_f$ 領域では液状移動、高 $V_f$ 領域ではガス状移動と考察した。

### 1. 緒 言

畜肉ジャーキーの製造は、北海道の良質な原料を利用したさまざまな取り組みが行われている。このジャーキーの品質は色や硬さに嗜好性が強く影響し<sup>1~2)</sup>、それら因子には含水率が影響する。例えば、ビーフジャーキーは我々にも比較的身近な畜肉乾燥製品であり、そのビーフジャーキーの嗜好性については、含水率と色により特徴づけられ、含水率では3つの水分(含水率( $W$ )= 22~23、27~28、33~43%-d.b.)、色度については $a^*$ = 8~13、 $b^*$ = 4~9であると嗜好性が強くなる傾向があると報告されている<sup>3)</sup>。

我々のこれまでの報告<sup>4~10)</sup>で、イカ、サケなどの水産食品に含有される水分種は、含水率110~120%-d.b.を境界として弱吸着水分種-A<sub>1</sub>と強吸着水分種-A<sub>2</sub>との異なる2種類の水分種に分類されることを示した。この時、脱水の動特性を支配する因子は含水率であるが、ジャーキーについても同じ挙動が観測されるか興味あることである。一般にジャーキー乾燥には乾燥工程中の含水率のバラツキが多く、統一した製造条件の指標が無いことが知られている。例えば、Ruiz-Cabreaら<sup>11)</sup>は、豚肉の水分異動について報告し、脂質量に水分移動のための有効拡散係数が強く影響を受ける

\*寒地資源高度利用研究所 所長

ことを報告している。このことから、ポークジャーキーの場合これまで研究してきた水産食品の水分移動挙動とは異なる多様な因子が関与した非線形性の高い脱水応答を示すことが予想される。

本研究では、ポークジャーキー乾燥工程を支配する因子を明らかにするために、(1)乾燥工程中に変化する水分種状態の検討、(2)水分種の脱水特性への影響、(3)乾燥材料成分(脂質)の脱水挙動への影響、について検討を行った。

## 2.実験方法

### 2.1 通風乾燥装置

乾燥工程の実験には通風乾燥装置を用いた。本装置の乾燥室は300×300×300mmであり、送風機、ヒータ、乾燥室により構成されている。乾燥用空気は外気を送風機により乾燥室下部に導入し、シーズヒータ(出力1130W)により所定温度に加熱される。加熱調整した乾燥用空気は、整流部を経由し乾燥室に導入し乾燥試料部を通過後排気口より排出される。試料乾燥部での乾燥空気流速は約0.7m/secに設定した。試料は約10meshのステンレス網製の試料皿に静置し、乾燥室内の底面より150mm上部に設置した。

### 2.2 乾燥試料

試料には冷凍した豚の内モモ肉を用い、6×50×50mmに整形し、解凍後調味液に浸漬したものを試験に用いた。この試料の初期含水率( $W_D$ )は220~320%-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。テストに用いた試料の脂質割合(LR)は、湿量基準含水率を用いた以下の簡易式により算出した。

$$LR(\% - w.b.) = 78.1 - W_D(\% - w.b.) \dots (1)$$

$$LR(\% - d.b.) = \left( \frac{LR(\% - w.b.)}{100 - LR(\% - w.b.)} \right) \times 100 \dots (2)$$

### 2.3 乾燥及びあん蒸操作条件

乾燥工程は乾燥温度( $T_D$ )は40~80℃、相対湿度(RH)は10~30%の条件で行った。乾燥工程途中で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 $W_0 = 10 \sim 300\% - d.b.$ 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。

### 2.4 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、乾燥試料はロードセル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変化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。

尚、用いた乾燥試料は含水率の低下に伴い体積も減少し、この体積減少は水分移動速度に影響を与えるが、本研究では第一次近似として影響は無いものとして解析を行った。

### 2.5 乾燥物断面構造の観察

乾燥工程中の乾燥物構造変化の評価のために、所定含水率に調整したポークジャーキー試料の内部構造の観察を行った。観察には大型測定顕微鏡MTM-250(オリンパス社製)を用いて、観測倍率は約200倍で行った。

## 3.実験結果及び考察

### 3.1水分種非線形脱水パラメータ $D_r$ , $De$ , $T_p$ の動特性

$T_D = 60^\circ\text{C}$ でのポークジャーキーの連続乾燥時及びPUP工程後の脱水挙動を図1に示した。図1-aはポークジャーキーの連続乾燥工程中の脱水応答曲線の図上微分から求めた脱水速度( $D_r$ )の経時変化挙動であり、 $D_r$ は乾燥初期より徐々に低下し、乾燥工程初期より減率乾燥期間であることが分かる。この連続乾燥工程途中の所定の含水率時にPUPを導入した場合の再乾燥時の $D_r$ をFig.1-b ~ fに示した。連続乾燥工程中の食材の含水率は、表面ほど低含水率となる含水率分布を形成するが、PUP操作によりその含水率分布は試料内で均一化

する。即ち表面含水率が上昇する。この表面含水率向上に起因してPUP後の再乾燥工程の初期 $D_r$ は連続乾燥曲線に比べステップ状に増加する。この結果は、乾燥材料内の含水率分布に $D_r$ が強く影響を受けることを示している。

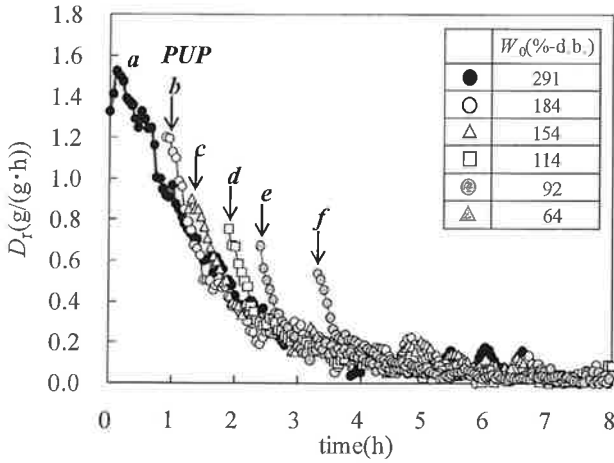


図1 ポークジャーキー乾燥工程でのあん蒸操作による脱水速度( $D_r$ )の増加挙動 ( $T_0 = 60^\circ\text{C}$ )

減率乾燥期間の脱水特性は内部水分の表面層への拡散移動に支配されている<sup>12~13</sup>。このため乾燥工程中の水分移動評価のために、水分の有効拡散係数( $De$ )を用いた。図1の連続乾燥初期及びPUP後の脱水挙動より再乾燥時初期の30min含水率変化量( $\Delta W$ )を求め、以下の拡散方程式を用いて $De$ を算出した。<sup>14</sup>

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot De \cdot t}{4 \cdot (L_a^{-2} + L_b^{-2} + L_c^{-2})}\right) \dots (3)$$

$$D_R = \frac{1}{100} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta t} \dots (4)$$

ここで、 $W$ :含水率(%-d.b.)、 $W_e$ :平衡含水率(%-d.b.)、 $W_0$ :連続乾燥初期の含水率(%-d.b.)、 $De$ :有効拡散係数( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $t$ :乾燥時間(h)、 $L_a$ 、 $L_b$ 、 $L_c$ :乾燥試料の各辺の1/2(m)である。

PUP操作における再乾燥初期は乾燥試料中の含水率分布が比較的均一であり、含水率分布の影響を受けにくい脱水挙動を与える。このため、PUP後再乾燥初期の脱水挙動からは含水率分布の影響を受けにくい $De$ の算出が可能である。(2)式より $T_0 = 50, 60, 70^\circ\text{C}$ の $De$ を算出し、 $W_0$ の関数として図2に示した。図2では横軸は乾燥の進行と共に

右から左に移行する。ポークジャーキーの $De$ は $W_0 = 120\%-\text{d.b.}$ を境界として特徴的な挙動を示し、 $W_0 > 120\%-\text{d.b.}$ の領域(領域I)では $De$ は $W_0$ に依存せずほぼ一定値を与えるが、 $W_0 < 120\%-\text{d.b.}$ の領域(領域II)では $W_0$ の低下に伴い $De$ も急激に減少する。このことは、 $W_0 = 120\%-\text{d.b.}$ を境界として領域IIでは $W_0$ の低下に伴い移動しにくい状態の水分種に変化していること、水分種状態、水分移動機構が非線形的に変化していることを示している。

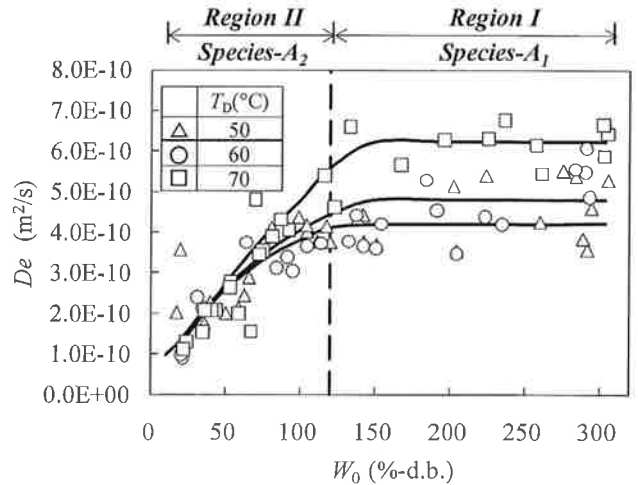


図2 水分の有効拡散係数( $De$ )の含水率依存性

我々のこれまでのイカやサケなどの水産物乾燥工程中の乾燥物品質には、乾燥物中の水分種状態が影響していることを明らかにしてきた。ポークジャーキー乾燥工程中の水分種状態も乾燥物品質に強く影響していることが予想される。そこで、ポークジャーキー乾燥工程中の水分種変化を乾燥物中の水分の昇温脱離(TPD)プロファイルを用いて評価した。これは所定の含水率に調整した試料を一定の昇温速度(本研究では昇温速度=  $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ と $1.0^\circ\text{C}/\text{min}$ )で昇温させたときの試料内水分の脱水特性を評価する手法であり、脱水ピーク及びピーク温度が乾燥物中の水分種の吸着状態の指標となる。<sup>15~17</sup> 所定の含水率試料をPUP操作により内部含水率が均一な試料に調整し、この試料のTPD時の脱水挙動を図3に示した。TPDプロファイルは低温域( $60^\circ\text{C}$ 近傍: Peak- $\alpha$ )と高温域( $110^\circ\text{C}$ 近傍: Peak- $\beta$ )の2つの脱水ピークを持ち、そのピーク温度は $W_0$ により変化する。

ここでPeak- $\alpha$ の水分種は $100^\circ\text{C}$ 以下で脱離してくる極めて弱い吸着水で食材の性質に依存しない

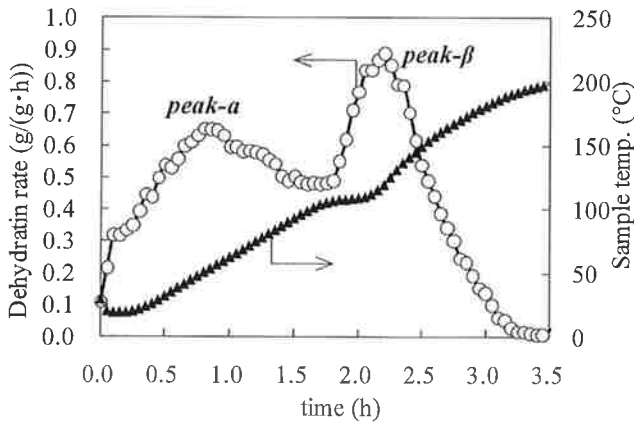


図3 ポークジャーキーのTPDプロファイル ( $W_0 = 161\% \text{-d.b.}$ ,  $\beta = 1.0^\circ\text{C/min}$ )

性質を持っていると思われる。一方Peak- $\beta$ の水分種は、食材の性質を反映する比較的強い吸着力を持ったものと思われる。たとえばPeak- $\beta$ のピーク温度( $T_p$ )の含水率依存性を図4に示すように含水率に依存した特異的形態を与える。 $T_p$ の $W_0$ に対する変化は $W_0 = 120\% \text{-d.b.}$ を境界とする2つの領域(IとII)で異なり、領域Iでは $T_p$ は約 $110^\circ\text{C}$ であるが、領域IIでは $W_0$ の低下に伴い $T_p$ は $110$ から $140^\circ\text{C}$ へと高温にシフトする。このことは、領域Iでは水の沸点に比較近い $T_p$ 値を与えるが、領域IIでは $T_p$ は急激に増加し、脱水しにくい水分種に変わっていることを示している。これらの結果は、ポークジャーキーの乾燥工程中の水分種は、吸着強度の異なる弱吸着水分種-A<sub>1</sub>と強吸着水分種-A<sub>2</sub>に分類することが出来る。

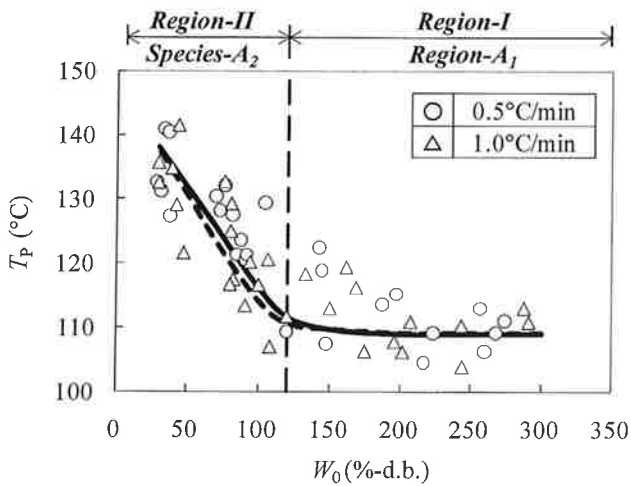


図4 ポークジャーキーのTPDプロファイルのピーク温度( $T_p$ )の $W_0$ 依存性

peak- $\beta$ の $T_p$ が高いものほど吸着力の強い水分種であることを示す。水分種-A<sub>1</sub>は含水率に依存せず同じ $T_p$ 値を与える。これは領域Iではその水分種は含水率に依存しないで同じ吸着の強さで吸着されていることを示す。一方領域IIに存在する水分種-A<sub>2</sub>は含水率の低下と共に $T_p$ 値を高くさせる。これは水分種-A<sub>2</sub>が含水率により強く影響を受ける性質を持っていることを示す。

### 3.2 脂質量による複合水分種脱水ダイナミズムへの影響

先に述べたように、豚肉の水分拡散係数には脂質割合が強く影響することがRuiz-Cabreaら<sup>10)</sup>により報告されている。これは、豚肉内部の水分種の移動性に脂質が強く影響している可能性を示唆している。脂質割合(LR)の異なる試料の連続乾燥工程中の $D_r$ の変化を $W$ に対してプロットし図5に示した。図中、脂質割合は乾量当たりの脂質量の割合(%-d.b.)で示し、本試験ではその値が15.6, 16.7%-d.b.は脂質割合が小さい低脂質試料であり、20.7, 22.9%-d.b.は脂質割合が大きい高脂質試料である。乾燥の進行( $W$ の低下)にともない $D_r$ は徐々に低下するが、乾燥期間全域において高脂質試料の $D_r$ は低脂質試料より小さな $D_r$ を与え、明らかに脱水速度は脂質割合に強い影響を受けていることが分かる。

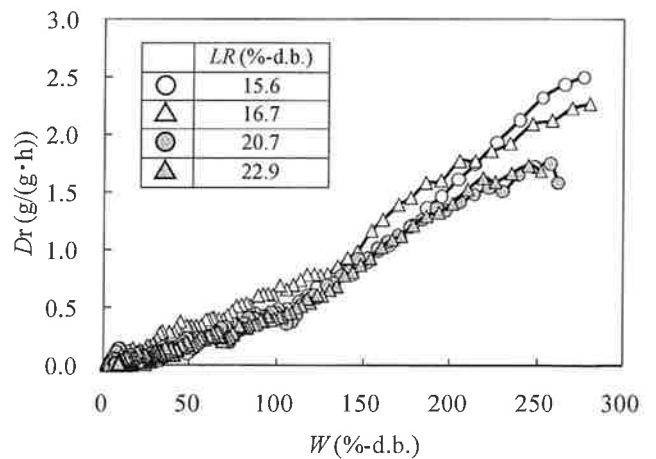


図5 脂質割合(LR)の脱水速度( $D_r$ )に対する影響

脂質の割合と脱水挙動の関係について $De$ を用いて検討した。図5の異なる脂質割合試料の連続乾燥工程中の脱水挙動より、 $De$ を算出し、 $W$ に対して整理した結果が図6である。連続乾燥工程中、

$De$ は $W$ の低下に伴い徐々に小さくなり、連続乾燥工程における拡散係数は図2に示したPUP操作後求めた $De$ とは全く異なる挙動を与えた。このことは、表面と内部との含水率分布の違いが水分移動に強く影響することを示している。

脂質割合の違いに着目すると、高脂質試料は低脂質試料より小さな $De$ を与え、両者の $De$ 値の違いは低 $W$ 値ほど大きくなる。このことは明らかに脂質割合が水分拡散に影響を与えること、含水率が低い場合ほど脂質の影響が大きくなる傾向を示している。

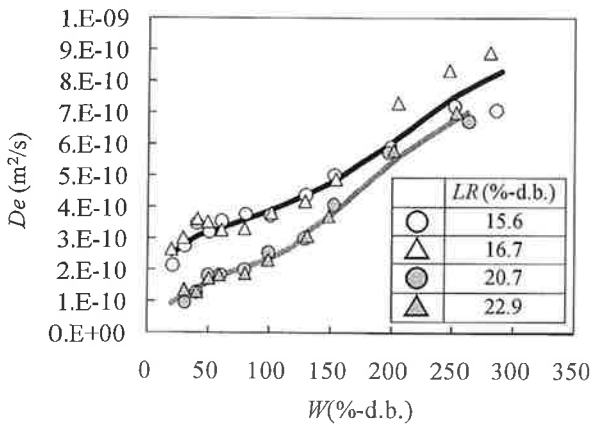


図6 脂質割合の水分の有効拡散係数( $De$ )への影響

ポークジャーキー中の脂質の水分移動への影響をより詳細に検討するために、PUPにより所定含水率に調整した試料の脂質の割合をLipid ratioとして以下の(5)式より求め、異なる温度の $De$ 値を整理し図7に示した。

$$\text{Lipid ratio (\%)} = \frac{\text{乾燥試料中の脂質量 (g)}}{\text{乾燥材料中の脂質以外の量 (g)}} \times 100 \dots (5)$$

図7から分かるように、Lipid ratioが小さい場合は、温度が高いほど大きな $De$ 値を与えるが、Lipid ratioが大きくなると、温度の違いに対する $De$ 値の差は小さくなる。このことはLipid ratioが大きい場合には、脂質が水分の移動性を制御する主たる因子となることが示唆される。この結果からも、水分種の吸着状態は乾燥材料の脂質量により非線形的に変化することが分かる。

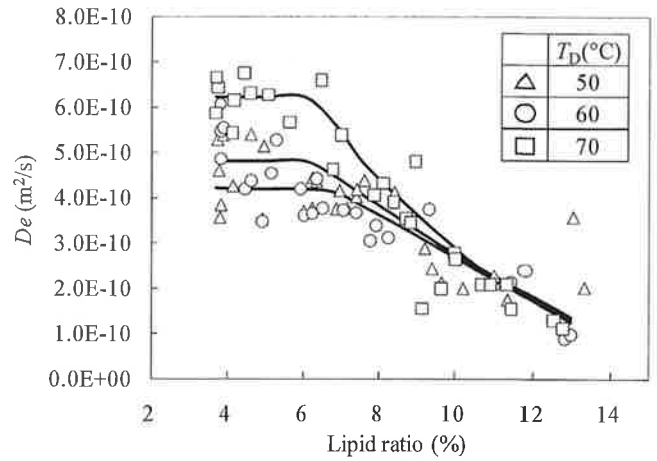


図7 Lipid ratioに対する $De$ の変化

### 3.3 ポーク食材構造パラメータの水分種動特性への影響

先に求めた $De$ は見かけの水分の有効拡散係数であり、その影響因子は乾燥材料の構造、水分種の状態など様々である。 $De$ は一般に次のArrheniusの式で示される。

$$De = \left( \frac{\epsilon}{\chi} \right) \cdot De^0 \exp\left( \frac{-E_D}{R \cdot (T_D + 273)} \right) = De^0 \cdot \exp\left( \frac{-E_D}{R \cdot (T_D + 273)} \right) \dots (6)$$

ここで、 $\epsilon$  : 空隙率[-]、 $\chi$  : 迷宮度[-]、 $De^0$  : 無限温度における拡散係数に対応する定数[m²/s]、 $De^0$  : 見かけの頻度因子[m²/s]、 $E_D$  : 見かけの拡散活性化エネルギー[kJ/mol]、 $R$  : 気体定数[mol/kJ·K]、である。

図2の異なる温度の $De$ のArrheniusプロットより $E_D$ を求め、 $W_0$ に対してプロットし、図8に示した。 $E_D$ 値は領域IとIIとで明らかに異なり、領域Iでは約16kJ/molと自由水の $E_D$ に近い値を示すが、領域IIでは $W_0$ の低下に伴い $E_D$ も低下する。水分種-A<sub>2</sub>は水分種-A<sub>1</sub>に比べその拡散移動のためのエネルギーバリアが小さく、含水率の低下に伴いその値は小さくなる。水分種の違いがポークジャーキーの脱水を非線形的に制御することが分かる。また、ポークジャーキー内の水分種はTPDの $T_p$ 及び $D_p$ の結果より弱吸着水分種-A<sub>1</sub>と強吸着水分種-A<sub>2</sub>に分類されたが、それら水分種の拡散移動のエネルギーバリアは、吸着状態の強さとは一致しないことが分かる。

次に、乾燥材料の構造面から水分の移動性を検討するために、乾燥工程中のポークジャーキーの断面観察を行った。所定の含水率に調整した試

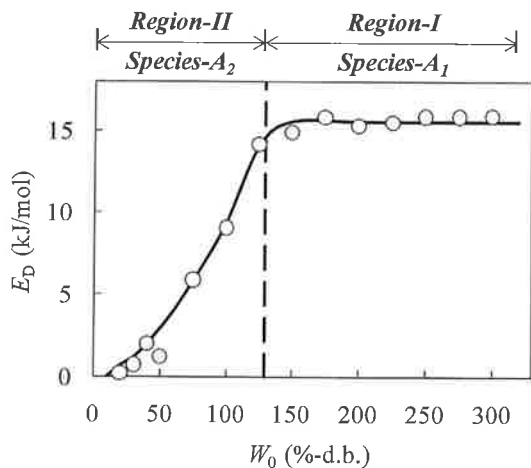


図8 水分種状態と拡散の活性化エネルギー( $E_b$ )

料の断面を光学顕微鏡で観察した。 $W_0 = 134\%$ -d.b.と $44\%$ -d.b.の断面画像を図9に示した。図から分かるように、ポークジャーキー断面には、 $W_0$ の低下にともない水分の移動通路となる空隙の生成及び拡大が確認できる。



図9 ポークジャーキー断面の細孔構造 ( $W_0 = 134\%$ -d.b.と $44\%$ -d.b.)

ポークジャーキーの断面観察で得られる空隙を空隙率( $V_f$ )として以下の式で整理した。

$$V_f = \frac{\text{断面観察画像中の空隙の面積 (m}^2\text{)}}{\text{断面観察画像の全面積 (m}^2\text{)}} \cdots (7)$$

$T_b = 50^\circ\text{C}$ と $70^\circ\text{C}$ の $V_f$ を求め図10に示した。乾燥初期は空隙が存在せず $V_f$ 値はほぼ0であるが、脱水の進行に伴い徐々に $V_f$ 値は大きくなる。 $V_f$ 値は $50^\circ\text{C}$ に比べ $70^\circ\text{C}$ の方が僅かに多い傾向にあり、 $T_b$ が高いほど、空隙が生成しやすいと考えることができる。一方、空隙の形状に注目すると、図9から確認できるように、低含水率においては、小さな空隙が多数生成することがわかる。このことは、含水率の低下により空隙率 ( $V_f$ ) は増加するが、迷路度( $\chi$ )は低下していると考えられることができる。(6)式から分かるように $De^0$ の中身は複

雑な因子から構成されており簡単ではないが、例えば迷路度、空隙率などが含水率の低下に応じてダイナミックに変化することを示している。これらの結果は、先に述べた脂質含量や乾燥材料内の細孔構造(空隙率、迷路度)が水分の移動性に複雑に影響していることを示している。

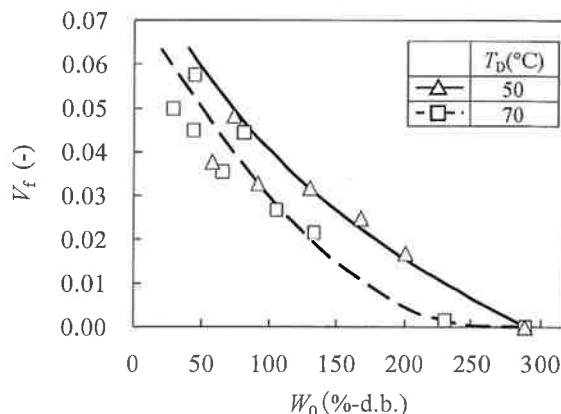


図10 ポークジャーキー空隙率( $V_f$ )の $W_0$ 依存性

空隙率 $V_f$ の水分移動機構への影響を評価するための、 $T_b = 50^\circ\text{C}$ と $70^\circ\text{C}$ の $De$ を $V_f$ に対し整理し図11に示した。乾燥開始時は $V_f = 0$ を与え $T_b = 50^\circ\text{C}$ では $V_f = 0 \sim 0.023$ の領域では $De$ は一定値を与え、 $V_f$ が $0.023$ 以上の領域では $V_f$ の増加に伴い $De$ が減少する。図8に示した拡散の活性化エネルギー( $E_b$ )と併せて考察すると、このことは小さな $V_f$ 値領域では水分移動が液状移動であるが、大きな $V_f$ 領域では水分移動がガス状水移動となり水分種の食材構造体への吸着・脱離などによる表面移動が優勢となる水分移動機構へと変化していると理解できる。

ここで更に定量的考察をすると、単位時間、食材単位断面当たりの全水分種移動量を $N_t$  ( $\text{g}\cdot\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )とし水分種の分子拡散移動量を $N_{AB}$  ( $\text{g}\cdot\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )、Knudsen拡散移動量を $N_K$  ( $\text{g}\cdot\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )、吸着水分種食材表面移動量を $N_s$  ( $\text{g}\cdot\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )とすると

$$N_t = N_{AB} + N_K + N_s \cdots (8)$$

が成立する。ここで $N_K$ を無視できると仮定すると

$$N_t = N_{AB} + N_s \cdots (9)$$

$$N_t = \left[ -D_{AB} \left( \frac{dC_w}{dz} \right) \right] + \left[ -D_s \left( \frac{dC_s}{dz} \right) \right] \cdots (10)$$

となる。ここで、 $D_{AB}$ :水分種の分子拡散移動係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]、 $D_s$ :吸着水分種の拡散移動係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]、

$C_w$ : 分子拡散水分種量[g-mol/m<sup>3</sup>]、 $C_s$ :吸着水分種量[g-mol/m<sup>3</sup>]、 $z$ : 水分種の拡散移動距離[m]である。

ここで $N_i$ を有効拡散係数で表現すると

$$N_i = -De \left( \frac{dC_w}{dz} \right) \dots (11)$$

$$De = \left( \frac{\varepsilon}{\chi} \right) \cdot D_{Ab} = \left( \frac{\varepsilon}{\chi} \right) \cdot D e^0 \cdot \exp \left( \frac{-E_D}{R \cdot (T_D + 273)} \right) \dots (12)$$

となる。(12)式中の $\varepsilon$ は $V_f$ の関数であることより、ポークジャーキーの脱水の進行により、 $\varepsilon$ は大きくなるが、迷路度 $\chi$ がそれ以上に大きくなり $De$ は相対的に低下すると理解できる。図11における $V_f < 0.03$ 領域では(10)式右辺の第2項は無視され第1項だけの寄与により $De$ 値は一定値を示す。 $V_f > 0.03$ 領域では $C_w$ 値が小さくなり、第2項の表面拡散量の寄与が大きくなるが、それに加えて迷路度 $\chi$ の寄与も大きくなる。そのことが $De$ 値を下げる結果を与えると考えることができる。

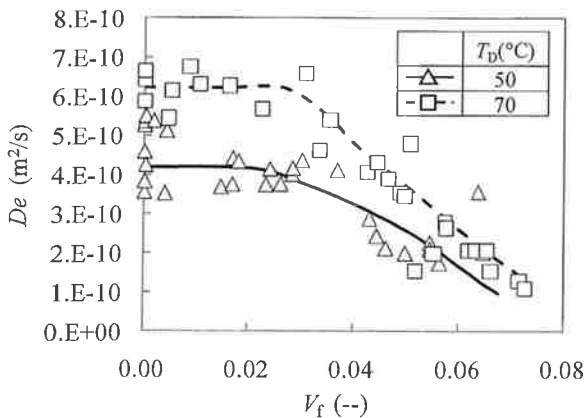


図11 ポークジャーキー水分有効拡散係数の $V_f$ 依存性

#### 4. 結論

ポークジャーキーの最適な乾燥技術を目的に、乾燥工程を支配する因子を明らかにするために、(1)乾燥工程中に変化する水分種状態の検討、(2)水分種の脱水特性への影響、(3)乾燥材料成分(脂質)の脱水挙動への影響。行い以下の結論を得た。  
 (1)ポークジャーキー水分種はダイナミズムの異なる水分種- $A_1$ 、 $-A_2$ から構成されている。  
 (2)それら2つの水分種は含水率、脂質含量、細孔構造に依存して非線形脱水を出現させる。  
 (3)水分の非線形脱水を制御するパラメータは脂

質含量、水分種、有効拡散係数などである。

#### 参考文献

- 1)Konieczny, P., Stangierski, J., and Kijowski, J. (2007). Physical and chemical characteristics and acceptability of home style beef jerky. *Meat Science*, 76, 253-257.
- 2)Anonymous. (2009). American Style Great Beef Jerky. Available from <http://www.greatJerky.com>.
- 3)門司農林水産消費技術センター報告書, (2005), 乾燥食肉製品(ビーフジャーキー)の品質特性と嗜好性.
- 4)Konishi, Y. and Kobayashi, M. (2003). Characteristic innovation of a food drying process revealed by the physicochemical analysis of dehydration dynamics, *Journal of Food Engineering*, 59, 277-283.
- 5)小西靖之, 小林正義, 三浦宏一, (2005). 食品乾燥工程の水分種制御と最適操作技術開発, ケミカルエンジニアリング, 50, No.6, 49-57
- 6)Konishi, Y., Miura, K. and Kobayashi, M. (2003). Drying Efficiency Design Using Multifunctional Dynamics of Water Molecules in Foods-H-NMR Analysis of a Fish Paste Sausage and Squid, *AIDC Conference series*(published by AIDIC & Reed Business Information S.p.A.), Vol.6, pp183-190.
- 7)小西靖之, 三浦宏一, 柴山由宇, 松田弘喜, 小林正義, (2006). 食品工学のためのプロトンNMR法の応用, ケミカルエンジニアリング, 51, No.10, 55-65.
- 8)Konishi, Y. and Kobayashi, (2007). M., Innovated food design visualized in the nonlinear analysis of multi-function water species based on the specified physicochemical parameters, *European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6)*, Vol.2, 959-960.
- 9)Konishi, Y., Kobayashi, M., and Miura, K., (2008), Characterization of Water Species Revealed in the Drying Operation of Squid by Using Water Proton NMR Analysis, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Chemical and Biological Engineering Conference-CHEMPOR 2008*.
- 10)konioshi, Y. Kobayashi, M., and Miura,

- K.(2010), Characterization of water species revealed in the drying operation of *Todarodes pacificus* Steenstrup by using water proton NMR Analysis, *International Journal of Food Science and Technology*, (45), 1889-1894.
- 11)M. A. Ruiz-Cabrea, P. Gou, L. Foucat, J. P. Renou and J. D. Daudin, (2004). Water transfer analysis in pork meat supported by NMR imaging, *Meat Sci.*, 67,169-178.
- 12)Konishi, Y., Horiuchi, J., and Kobayashi, M., (2001), Dynamic Evaluation of the Dehydration Response Curves of Foods Characterized by a Poultrice-up Process Using a Fish-paste Sausage-I. Determination of the Mechanisms for Moisture Transfer, *Drying Technology*, 19(7), 1253-1269.
- 13)Konishi, Y., Horiuchi, J., and Kobayashi, M., (2001), Dynamic Evaluation of the Dehydration Response Curves of Foods Characterized by a Poultrice-up Process Using a Fish-paste Sausage-II. A New Tank Model for a Computer Simulation, *Drying Technology*, 19(7), 1271-1285.
- 14)Jason, A.C. (1958), A Study of Evaporation and Diffusion Processes in the Drying of Fish Muscle. In *Fundamental Aspects of Dehydration of Food Stuffs*, ed. Society of Chemical Industry. McMillan, London, 103-134.
- 15)Konishi, Y., Horiuchi, J. and Kobayashi, M. (1999), Optimal design of a poultrice-up process operation in food drying process developed for keeping good quality of foods, *Proceedings of EURO FOOD CHEM X*, Vol.3, 744-751.
- 16)Konishi, Y. and Kobayashi, M. (2003), Characteristic innovation of a food drying process revealed by the physicochemical analysis of dehydration dynamics, *Journal of Food Engineering*, 59, 277-283.
- 17) Konishi, Y. Miura, K. and Kobayashi, M. (2003), Drying Efficiency Design Using Multifunctional Dynamics of Water Molecules in Foods- H-NMR Analysis of a Fish Paste Sausage and a Squid -*Chemical Engineering Transactions*, 3, 1641-1646.