

研究ノート

常圧凍結乾燥におけるカットダイコンの含水率変化 および乾燥・復水後の品質に関する基礎的研究

小出章二*, 西沢佳恵, 齋藤菜月, 大須賀 玲, 折笠貴寛, 上村松生

岩手大学農学部

Study on Moisture Content Changes during Atmospheric Freeze Drying of Fresh-cut Japanese Radish and its Quality after Drying and Rehydration

Shoji Koide*, Kae Nishizawa, Natsuki Saito, Rei Osuga, Takahiro Orikasa and Matsuo Uemura

Faculty of Agriculture, Iwate University, 3-8-18 Ueda, Morioka, 020-8550

We conducted atmospheric freeze drying (AFD) of fresh-cut Japanese radish (daikon) at different temperatures (0, -5, -10, -18 °C) with an air speed of 0.43 m·s⁻¹, and evaluated moisture content changes. We assessed samples dried by AFD for surface color, soluble solids content (°Brix), rehydration ratio, and texture (breaking stress and initial elasticity) after rehydration. In the rehydration and texture tests, we compared AFD using -5 °C samples and samples dried by hot air at 60 °C. An exponential model was used to describe the sample moisture content during AFD, which decreased exponentially with drying constant with an Arrhenius-type temperature dependency. Compared to the sample dried at 60 °C, the rehydration ratio was 1.29 times higher for AFD at -5 °C, and the sample showed a large number of voids. There were no significant differences between the -5 °C and 60 °C samples in terms of breaking stress or initial elasticity. These results indicate that AFD is an effective drying method for preserving the quality of products.

(Received May 18, 2021 ; Accepted Aug. 30, 2021)

Keywords : atmospheric freeze drying, moisture content changes, fresh-cut Japanese radish, quality, rehydration

キーワード : 常圧凍結乾燥, 含水率変化, カットダイコン, 品質, 復水

乾燥は生鮮食品の保存性を高める手段として古くから行われてきた加工操作のひとつであり、貯蔵安定性の向上、輸送性の向上、栄養成分の濃縮等の高付加価値化等を図ることを目標としている。食品の乾燥方法には原料の特性や乾燥の目的に応じて熱風乾燥や冷風乾燥など様々なものがある。なかでも栄養価や味の変化が少ないという観点から真空凍結乾燥（以下、フリーズドライ）が近年注目されている^{1)~3)}。フリーズドライは水分が昇華により除去されるため、乾燥後も形状、品質などが良好に保持され、乾燥製品は多孔質となり復水性が良い¹⁾。しかしフリーズドライは多くの電力や設備が必要であり、製造コストが高い等の課題も残されている^{4)~6)}。一方で Atmospheric freeze-drying^{4)~9)}（以下、常圧凍結乾燥）は、フリーズドライと同様に、水分が昇華により除去されるため品質の変化が少なく、圧力を操作する必要のないことから、近年省エネルギー化が検討されている乾燥法の一つであり、水分の高い青果物に対しても将来有効な乾燥法の一つとなりうると考える。しかし青果物の常圧凍結乾燥は相変化を伴うものであ

り、その乾燥速度の温度依存性や乾燥後の品質、および乾燥試料を復水した際の復水率やテクスチャーについて検討した例はみあたらない。

そこで青果物の常圧凍結乾燥の基礎的研究として、乾燥特性に関する研究例が多いカットダイコン^{10)~12)}をモデル材料として用い、種々の温度で常圧凍結乾燥させ、含水率の経時変化を指数モデルで近似するとともに、その乾燥速度の温度依存性について検討を試みた。更に本研究では品質評価の観点から、乾燥後試料の色彩および糖度を測定するとともに、-5 °Cで常圧凍結乾燥した試料と60 °Cで乾燥した試料の復水率および復水後のテクスチャー（破断強度および初期弾性率）について測定・検討したのでその結果を報告する。

1. 実験方法

(1) 供試材料

盛岡市内の量販店にて購入したダイコン (*Raphanus sativus* var. *hortensis*) を供試材料とした。測定用サンプル（以下、試料）はダイコンの外皮を剥き、繊維方向が長辺方

向となるように縦・横・厚さ（以下、長辺・短辺・厚さ）が 50, 25, 10 mm（質量 13.5 ± 0.5 g）の直方体試料を成形した。試料の初期含水率を 105°C -24 h 炉乾法により計測したところ含水率 1919 ± 61 (% (db))（水分 95.0 ± 0.2 (% (wb))）であった。

(2) カットダイコンの乾燥方法

乾燥はインキュベータ（LU-114, エスベック株式会社, 温度変動範囲 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ ）を用いて行った。乾燥温度は 60, 0, -5 , -10 , -18°C とし、測定開始時の試料温度は約 10°C とした。試料は上部に穴をあけ S 字フックを用いてインキュベータ内につるし試料平面を通風乾燥した。乾燥は試料の含水率が 40 (% (db)) 以下になった時点で終了とした。但し乾燥温度 -18°C では乾燥に時間を要するため、乾燥開始後 8 日目（最終含水率の平均値：246 (% (db))）で測定終了とした。本実験においてインキュベータ内の風速は平均 0.43 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) であり、温度 0, -5 , -10 , -18°C において相対湿度は 32~40 % の範囲内であった。

試料の質量変化の測定は乾燥温度 0, -5 , -10 , -18°C の条件下で行った。また、試料の色彩および糖度の測定は、温度 0, -5 , -10°C にて乾燥させた試料を用いて行い、これらを生鮮試料の測定値と比較した。測定は三反復行った。

乾燥後試料の復水率およびテクスチャーの測定は、温度 -5°C , 60°C にて乾燥させた試料を用いた。測定は三反復行った。

(3) 測定項目

i) 質量変化（含水率変化）

一定時間毎に試料をインキュベータから取り出し電子天秤を用いて、その質量を測定し、再びインキュベータ内へ戻す方法をとった。減少した質量は全て蒸発水分とみなし、含水率を算出した。

ii) 温度変化

試料の中心部に T 型熱電対を挿し、試料の温度変化をデータロガー（midi Logger GL220, グラフテック株式会社）を用いて 5 分間隔で計測した。試料の温度変化の測定は乾燥温度 0, -5°C の条件下で行った。

iii) 色彩

乾燥前後の試料表面の色彩を、色彩色差計（CR-20, コニカミノルタ株式会社）を用いて $L^*a^*b^*$ 表色系により測定した ($n=3$)。測定部位は任意の 3 点としそれらの平均値を解析に用いた。乾燥前後の L^* 値, a^* 値および b^* 値の差 (ΔL^* , Δa^* および Δb^*) から以下の式により色差 ΔE を算出した。

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

iv) 糖度

ポケット糖度計（PAL-J, アタゴ株式会社）を用いて乾燥前後の糖度の測定を行った。測定では試料を細かく刻

み、質量に応じて蒸留水を加え希釈した。その後ホモジナイザー（CM-100, アズワン株式会社）で一定時間ホモジナイズした後、濾過した。測定値および希釈倍率から糖度 ($^\circ\text{Brix}$) を求め、乾物質量あたりの糖度を算出した。

v) 組織構造の観察

温度 -5°C および 60°C で乾燥した試料の微細構造を走査型電子顕微鏡（SEM）（JSM-7800 PRIME, JEOL）を用いて加速電圧 5 kV, 倍率 100 倍の反射電子像で観察した。観察部位は試料の中心部の断面とした。

vi) 復水率およびテクスチャー

乾燥温度 -5°C および 60°C にて乾燥した試料をデシケーター内に入れ、これを 5°C のインキュベータ内で最低 1 日間保存し、試料の含水率を 19.4 ± 2.4 (% (db)) および水分活性を 0.37 ± 0.01 となるように調整し測定に用いた。ここに試料の水分活性は試料温度 25°C の条件のもと恒温型水分活性装置（Lab Master-aw, Novacina 社製）を用いて計測した。

復水は 300 mL の蒸留水 (5°C) の入ったタッパー内に試料（質量約 0.84 g）を浸漬させ、タッパーのフタをした後、これを 5°C のインキュベータ内に静置することで行った。その後、一定時間毎に試料を取り出し、表面付着水分をキムワイプでふき取り、質量を計測した。復水は 1 時間当たりの試料の質量変化が、その試料の乾燥前の質量（約 13.5 g）の 0.5 % 以下となった時点で終了とした。復水率 (%) は既往の報告¹³⁾¹⁴⁾ に準じ、復水終了後の試料質量を、生試料の質量で割ることで算出した。

復水後試料のテクスチャー（破断強度と初期弾性率）は以下の要領で計測した。はじめに復水後試料（直方体試料）中央部から、長辺と短辺が 15 mm および 10 mm となるようサンプルを作製した。ここにサンプルの厚さは復水後の厚さとした。次にサンプルをクリープメータ（TPU-20, 株式会社山電）の試料台に置き、クサビ型プランジャ¹³⁾¹⁵⁾（W: 13 mm, D: 30 mm, H: 25 mm, 角度 30° 度, 先端 1 mm 幅平面, ポリアセタール樹脂製）をサンプルの繊維方向に対して垂直にあたるように押し込んだ（速度 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, クリアランス 2.0 mm）。測定は室温で行った。得られた荷重-ひずみ曲線と、プランジャの接触面積から、ひずみ 0 から 0.05 の範囲内においてみられる直線の傾きを初期弾性率 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$) とした。またサンプルが破断を起こしたときの強度を破断強度 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$) とした。

vii) 統計処理

本実験で測定して得られたデータは平均値 \pm 標準偏差として示した。統計処理は統計ソフト（エクセル統計 ver 2.13, 社会情報サービス株式会社）を用いて行った。2 群間の比較は t 検定により、3 群以上の比較は Tukey-Kramer 法を用いた多重比較試験により群間の有意差を検討した。有意差の判定は有意水準 5 % 未満で行った。

2. 実験結果および考察

(1) 乾燥特性

各乾燥温度条件における含水率の経時変化を Fig. 1 にプロットで示す。これを見ると、常圧凍結乾燥 (0, -5, -10, -18℃) における試料の含水率は時間とともに指数関数的に減少すること、また乾燥速度は温度が高いほど速いことがわかる。この傾向は、ナスを用いて常圧凍結乾燥を行った既往の報告⁸⁾と同様である。本研究では、この含水率変化を指数モデル¹⁶⁾を用いて含水率曲線のフィッティングを行った。

$$(M - M_e) / (M_0 - M_e) = \exp(-kt) \quad (2)$$

ここに、 M は含水率 (% db), M_e は平衡含水率 (% db), M_0 は初期含水率 (% db), k は乾燥速度定数 (h^{-1}), t は乾燥時間 (day) である。実測値を式 (2) にあてはめ、定数 M_e , k を非線形最小二乗法により算出した。図中曲線は、得られた各定数をもとに、各乾燥温度での計算値を表したものである。含水率 (計算値) は実測値を精度良く近似 ($\text{RMSE} \leq 56.5$ (% db)) できることが示された。

Fig. 2 には乾燥温度 0℃ および -5℃ における試料温度の経時変化の一例を示す。乾燥温度 0℃ において試料の品温は -2.5℃ まで低下した後、乾燥時間とともに上昇し 36 時間後 (含水率 160 (% db)) には -0.5℃ となり、その後 0℃ に漸近した。この温度変化を考察するため、以下にダイコンの凍結点から試料の凍結率を推算する。ダイコンの凍結点は既往の研究¹⁷⁾より -0.4℃ と報告されている。これより試料の凍結率を以下の Heiss の近似式¹⁸⁾¹⁹⁾を用いて推算する。

$$X = 1 - t_f / t \quad (3)$$

ここに、 X は凍結率 (-), t_f は凍結点温度 (℃), t は凍結後の平均温度 (℃) である。これより -1.0, -1.5, -2.0, -2.5, -5.0℃ のときの凍結率は 0.60, 0.73, 0.80, 0.84, 0.92 と計算される。

これらの推算値と本研究結果をあわせて考えると、乾燥温度 0℃ のとき、試料は乾燥初期において冷風と試料との間における対流伝熱と試料の内部における伝導伝熱の組合せで冷却が進む。あわせて試料の水蒸気圧と乾燥空気 (相対湿度: 32~40%) が有する水蒸気圧の差を駆動力として水分蒸発 (乾燥) が進行し、この際に蒸発潜熱を奪うため試料温度は凍結点 (-0.4℃) 以下となったと考えられた。その後、試料内水分は試料温度の低下とともに相変化を伴って凍結率が増大するため、乾燥は試料内の液相部分の乾燥 (蒸発による乾燥) と凍結部分の乾燥 (昇華による乾燥) が並行して進行していたものと考えられる。また試料温度が凍結点以下を保っていた理由は、乾燥の進行とともに蒸発潜熱および昇華潜熱が試料から奪われていたことによるものと考えられる。その後、含水率の低下に伴い試料

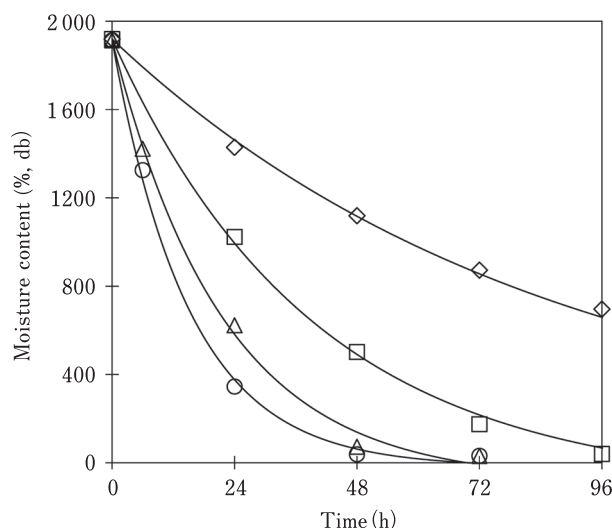


Fig. 1 Changes in moisture content of Japanese radish during atmospheric freeze drying

○, 0℃; △, -5℃; □, -10℃; ◇, -18℃). The symbols show average experimental data.

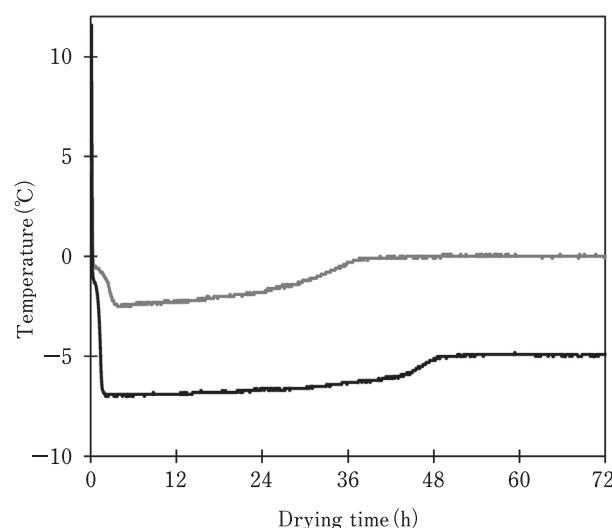


Fig. 2 Representative temperatures of samples during atmospheric freeze drying at 0℃ (gray line) and -5℃ (black line)

から奪われる潜熱量も減じ、試料温度は乾燥温度 (0℃) まで上昇したものと考えられる。

次に、乾燥温度 -5℃ の試料温度の経時変化をみると、-7℃ 以下まで低下した後、乾燥時間とともに品温は上昇し 47 時間後 (含水率 151 (% db)) には -5℃ に漸近した。この温度変化は乾燥温度 0℃ の説明と重なるが、乾燥温度が低い分、蒸発による乾燥よりも昇華による乾燥が支配的であったものと考えられる。今後は、試料水分が凍結点および凍結率に与える影響を計測し、上述した乾燥機構について検討を深めたい。

Fig. 3には乾燥前試料と乾燥温度 -5°C および 60°C にて乾燥した乾燥後試料の写真を示す。これを見ると 60°C 試料は乾燥により湾曲・収縮し、褐変も進むことがわかる。これに対し -5°C 試料は、乾燥前試料と比較して収縮がみられるものの直方体の形状は保たれた。本研究では、常圧凍結乾燥時の試料の液相部分の乾燥面および凍結部分の昇華面²⁰⁾が乾燥とともにどのように後退するのか定かではないが、含水率の経時変化が指数関数的に減少したのは乾燥時の体積収縮に伴う昇華面積の減少も一因であると推察する。

次に、計算により得られた乾燥速度定数 k のアレニウスプロットをFig. 4に示す。これを見ると乾燥速度定数はアレニウス型の温度依存性を呈することがわかる。ここにアレニウス型の実験式は絶対温度 $T(\text{K})$ の関数として以下で示される。

$$k = A \cdot \exp(-E/RT) \quad (4)$$

ここに、 k は乾燥速度定数 (h^{-1})、 A は頻度因子 (h^{-1})、 E は活性化エネルギー ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)、 R は気体定数 ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)、 T は温度 (K)である。

測定値を式(4)にあてはめ、最小二乗法により定数 A および E を決定したところ、それぞれ $2.06 \times 10^8 \text{h}^{-1}$ および $56.88 \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ となった。得られた計算値をFig. 4に直線で示す。図より測定値と計算値は良く一致した。常圧凍結乾燥の乾燥は多くの複雑な因子(材料形状、乾燥空気の風速・温湿度、試料の昇華面の変化、試料内部の温度・水分分布、試料のガラス転移温度など)により影響される。今回の測定結果は常圧凍結乾燥の乾燥速度がアレニウス型の実験式にしたがうことを示すもので、このことからカット青果物を氷点下で常圧凍結乾燥する際に、乾燥温度を変化させても、目的の含水率までに要する所要時間の推算が可能であることが示唆された。

(2) 色彩と糖度

Table 1に種々の乾燥温度における乾燥前後の試料の色彩色度と糖度の変化を示す。ここに乾燥温度 -18°C の試料は上述したように乾燥の途中(乾燥開始8日目、最終含

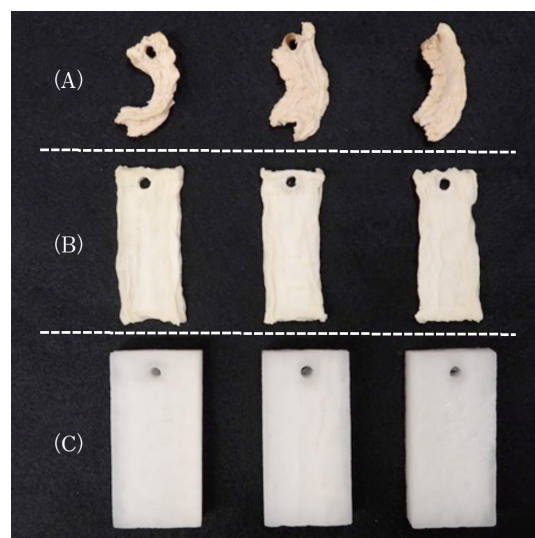


Fig. 3 Appearance of Japanese radish samples by hot air drying at 60°C (A), atmospheric freeze drying at -5°C (B), and fresh-cut Japanese radish sample (C)

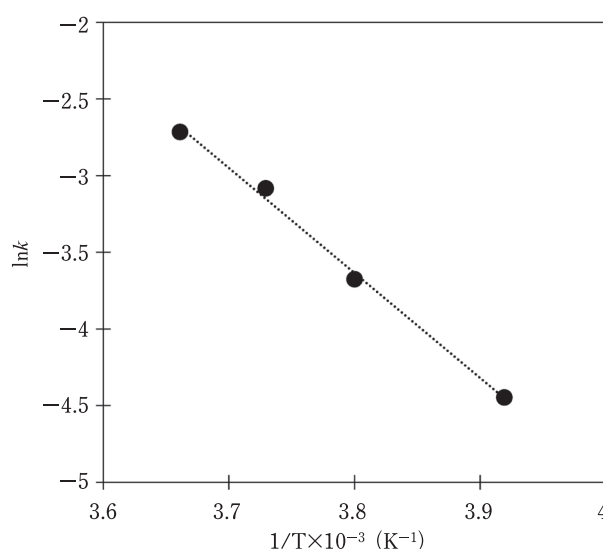


Fig. 4 Arrhenius type plots of atmospheric freeze drying constant against the reciprocal of temperature for Japanese radish sample

Table 1 Color (L^* , a^* , b^* , and ΔE) and Brix content of Japanese radish sample before and after hot air drying and atmospheric freeze drying

Sample	L^*	a^*	b^*	ΔE	Brix content ratio (-)
Fresh	61.9 ± 1.5^c	-0.7 ± 0.0^c	3.1 ± 0.5^c	—	—
0°C	76.7 ± 1.9^b	1.6 ± 0.2^a	20.8 ± 0.2^a	23.2 ± 1.1^b	1.01 ± 0.01^a
-5°C	87.2 ± 0.9^a	0.4 ± 0.1^b	17.1 ± 0.7^b	29.0 ± 1.1^a	1.03 ± 0.01^a
-10°C	85.3 ± 0.4^a	0.2 ± 0.3^b	15.9 ± 0.2^b	26.7 ± 0.2^a	1.00 ± 0.02^a

Each value represents the mean \pm standard deviation. The soluble solid content of the sample after drying to the sample before drying (fresh) was defined as the Brix content ratio (-). Different letters within a column show significant difference ($p < 0.05$) in the same measurement.

水率平均値 246 (% db)) で乾燥を終了させたため、他の温度で乾燥した試料との比較は行っていない。

表を見ると、試料の L^* 値は乾燥後に増加し、特に -5°C 試料と -10°C 試料は 0°C 試料よりも有意に高い値を示した。また a^* 値と b^* 値は、 -5°C 試料と -10°C 試料において 0°C 試料よりも有意に低い値を呈した。これらの結果より 0°C 試料において凍結濃縮²¹⁾²²⁾により酵素的褐変が増加した可能性も考えられる。しかし、それを確かめるには今後ブランシングした試料を用いて同様の実験を行う必要があると考える。加えて常圧凍結乾燥後の試料は、乾燥温度により試料内に生成する氷結晶の大きさに差が生じるため、結果として乾燥後の試料の収縮の程度が変化し、このことが色彩に影響を与える可能性も十分に考えられる。今後、常圧凍結乾燥後の試料の色彩の評価は、以上のことを十分に考慮して考察を深める必要がある。次に乾燥前後の糖度変化をみる。熱風乾燥 (60°C) では乾燥前後の糖度比は 1.03 ± 0.03 であったことを考慮すると、常圧凍結乾燥も熱風乾燥と同様に糖度を保ったままカットダイコンを乾燥できると考えられる。

以上得られた結果から、常圧凍結乾燥はカットダイコンの形状の保持、明度の保持に適した乾燥法であることが示された。今後は常圧凍結乾燥において他の品質 (L-アスコルビン酸含有率など) 変化について評価を行うとともに、ブランシングの有無が試料の品質や微細構造に与える影響について検討したい。

(3) 微細構造

常圧凍結乾燥中の試料の水の昇華の有無を検討するため、 60°C 試料と -5°C 試料の断面を SEM にて比較した。Fig. 5 に乾燥後の 60°C 試料と -5°C 試料の微細構造を示す。図より 60°C 試料と比較し -5°C 試料では明確な空隙が確認された。この空隙には常圧凍結乾燥中に氷結晶が存在していたことが推察される。一般に氷結晶は、試料の凍結速度や凍結温度、凍結時間に大きく影響²³⁾されるため、

今後は空隙率やその大きさと常圧凍結乾燥方法との関係性について調査したい。

(4) 復水率およびテクスチャー

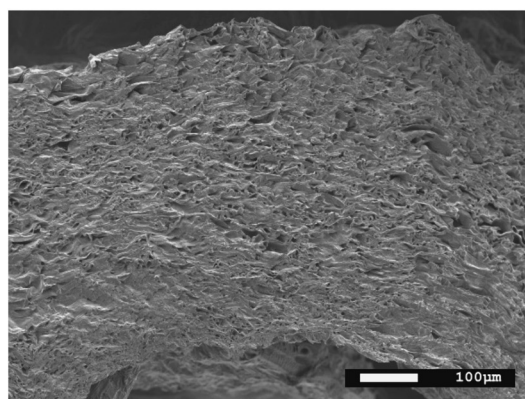
復水率およびテクスチャー測定の結果を Table 2 に示す。これより -5°C 試料は 60°C 試料と比較して復水率が有意に高くなった。復水率については、フリーズドライした青果物試料が熱風乾燥したものよりも高くなること²⁴⁾、青果物の乾燥を進行させると復水率が下がること¹³⁾が報告されている。また農産物は乾燥により試料の収縮が進み空隙損失や細胞構造の崩壊が過度に生じると吸水能力が減少するとの報告がある^{24)~26)}。したがって 60°C 試料は Fig. 3 や Fig. 5 に示したように乾燥収縮が進みすぎたこと、一方で -5°C 試料は常圧凍結乾燥により試料の収縮が抑制され、試料内部に明確な空隙が生じたため復水率に差が生じたものと考えられる。乾燥青果物の復水率は品質に影響を及ぼす重要なパラメータである。今回は -5°C 試料と 60°C 試料との比較ではあるが、常圧凍結乾燥は復水率の高い乾燥カットダイコンの製造を可能とする乾燥法であることが示唆された。

Table 2 Rehydration ratio, breaking stress, and initial elasticity of Japanese radish sample dried by atmospheric freeze drying at -5°C and dried at 60°C

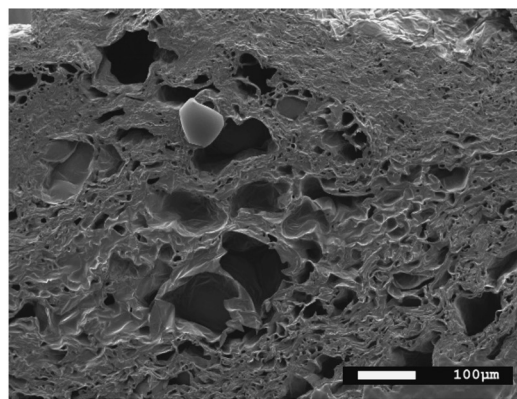
Sample	Rehydration ratio (g/g-fresh)	Breaking stress ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	Initial elasticity ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)
Fresh	—	$21.2 \pm 2.5^b (\times 10^5)$	$38.3 \pm 8.6^a (\times 10^5)$
-5°C	0.68 ± 0.04	$32.1 \pm 5.4^a (\times 10^5)$	$2.1 \pm 0.6^b (\times 10^5)$
60°C	$0.53 \pm 0.03^*$	$34.4 \pm 6.2^a (\times 10^5)$	$2.2 \pm 0.8^b (\times 10^5)$

Rehydration was performed at 5°C .

Each value represents the mean \pm standard deviation. Different letters within a column show significant difference ($p < 0.01$) in the same measurement. Significant differences from the control $^*p < 0.01$.



(A)



(B)

Fig. 5 Effect of different drying temperature on the microstructure of products. (A) 60°C by hot air drying, (B) -5°C by atmospheric freeze drying

次に復水後の試料のテクスチャーをみる。従来、植物組織のテクスチャーは、破断強度は細胞壁、初期弾性率は細胞膜に由来した変化だと考えられている¹⁵⁾。その観点から本結果を考察するなら、テクスチャー測定に用いた試料の体積率変化を考慮する必要がある。復水試験直後の試料サイズをノギスで計測し体積を算出し、生鮮試料の体積で割ると-5℃試料で63.1%、60℃試料で53.3%であった。テクスチャー測定はこれらの試料から同サイズの直方体となるように成型したものであるから、単純に考えるなら-5℃試料（テクスチャー測定用試料）は成型後の生鮮試料と比較して1.58倍、60℃試料（テクスチャー測定用試料）は1.88倍の細胞が存在していたとみなしてもよい。

このことから60℃試料の破断強度が生鮮試料と比較して有意に高い値となった理由は、乾燥による細胞の収縮によるものと、熱風乾燥が細胞壁に与えるダメージが少なかったことによるものと推察される。次に-5℃試料は、常圧凍結乾燥により試料内に空隙が発生したこと、また細胞の収縮の程度が抑制されたことから、破断強度は60℃試料よりも低い値となることが予想されたが、-5℃試料と60℃試料との間に有意な差はみられなかった。

次に、初期弾性率をみる。今回60℃試料の初期弾性率が生鮮試料と比較して有意に低い値を呈した理由は、乾燥温度が60℃と高く、細胞膜へのダメージが大きかったことに起因しているものと考えられる¹⁵⁾。次に常圧凍結乾燥した-5℃試料は、上述したように凍結率が-5℃にて0.92と近似されたことから、試料内の大部分の細胞膜は凍結により破壊されたと考えられる。しかし、初期弾性率に関して-5℃試料と60℃試料との間に有意な差はみられなかった。

以上より-5℃試料は60℃試料と比較して復水率が高く、復水後のテクスチャー（破断強度、初期弾性率）に有意な差がみられないことが示された。今回得られた復水率とテクスチャーは、常圧凍結乾燥温度-5℃および熱風乾燥温度60℃で乾燥した試料（復水前試料の水分活性0.37）を用いて測定したものである。今後は種々の乾燥温度の条件下で測定を行い、乾燥温度や乾燥時の最終含水率が復水率および復水後のテクスチャーに与える影響について検討したい。

3. 要 約

カットダイコンをモデル材料とし、種々の温度で常圧凍結乾燥（風速0.43 m・s⁻¹）させ、含水率の経時変化を指数モデルで表現するとともに、その乾燥特性と温度依存性について検討を試みた。更に常圧凍結乾燥後の試料の品質（色彩色度・糖度・復水率・テクスチャー）について測定・検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 常圧凍結乾燥において、試料の含水率の経時変化は指数モデルで精度よく近似できること、またその乾燥速度定数はアレニウス型の温度依存性を示すこと

が明らかとなった。

- (2) 常圧凍結乾燥はカットダイコンの形状の保持、明度の保持に適した乾燥法となるうことが示された。
- (3) -5℃試料（常圧凍結乾燥）の微細構造を観察した結果、60℃試料（熱風乾燥）と比較して明確な空隙を有していた。このことより常圧凍結乾燥により試料内部に生じた氷結晶が昇華により空隙となったことが推察された。
- (4) 乾燥試料を復水させたところ、-5℃試料は60℃試料と比較して復水率が有意に高い傾向を呈した。また-5℃試料は60℃試料と比較して復水後のテクスチャー（破断強度、初期弾性率）に有意な差がみられないことが示された。

本研究にご協力頂いた岩手大学技術部の佐々木邦明様ならびに小室岬様に謝意を表します。

文 献

- 1) Araki, T. and Kaminishi, K. (2005). Technological trends in freeze-drying. *Refrigeration*, **80**, 853-858（荒木徹也，上西浩史．冷凍食品の加工技術—凍結乾燥の技術動向—，冷凍）．
- 2) Sagara, Y. (2010). Advances in freeze-drying technologies for foods and their application to industrial operations. *Japan Journal of Food Engineering*, **11** (1), 1-11（相良泰行．食品凍結乾燥技術の進歩と実用操作への応用，日本食品工学会誌）．
- 3) Hatakenaka, K. (2015). New technology of freeze-dried foods -How to make miso soup-. *Journal of the Vacuum Society of Japan*, **58** (9), 334-338（畠中和久．最新フリーズドライ食品製造技術—おいしいみそ汁の作り方—，真空技術）．
- 4) Claussen, C., Ustad, T.S., Strømmen, I. and Walde, P.M. (2007). Atmospheric freeze drying — a review. *Drying Technology*, **25** (6), 947-957.
- 5) Mohammad, S., Rahman, A. and Mujumdar, A.S. (2012). Atmospheric Freeze Drying. In "Progress in Food Preservation," ed. by R. Bhat and A.K. Alias. John Wiley & Sons, pp. 143-160.
- 6) Colucci, D., Fissore, D., Rossello, C., and Carcel, J.A. (2018). On the effect of ultrasound-assisted atmospheric freeze-drying on the antioxidant properties of eggplant. *Food Research International*, **106**, 580-588.
- 7) Duan, X., Ding, L., Ren, G.Y., Liu, L.L., and Kong, Q.Z. (2013). The drying strategy of atmospheric freeze drying apple cubes based on glass transition. *Food and Bioprocess Processing*, **91**, 534-538.
- 8) Santacatalina, J.V., Soriano, J.R., Cárcel, J.A., and Garcia-Perez, J.V. (2016). Influence of air velocity and temperature on ultrasonically assisted low temperature drying of eggplant. *Food and Bioprocess Processing*, **100**, 282-291.
- 9) Nakagawa, K., Horie, A., and Nakabayashi, M. (2020). Modeling atmospheric freeze-drying of food products operated above glass transition temperature. *Chemical Engineering Research and Design*, **163**, 12-20.
- 10) Murata, S., Koide, S., and Miyauchi, K. (1993). Drying characteristics of sliced radish - Apparent falling rate drying by shrinking -. *Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery (Nogyo Kikai Gakkaiishi)*, **55** (4),

- 83-89 (村田 敏, 小出章二, 宮内樹代史, 千切大根の乾燥特性—収縮を伴うみかけの減率乾燥—, 農業機械学会誌).
- 11) Orikasa, T., Tagawa, A., Soma, S., Imoto, M., and Ogawa, Y. (2005). Hot air drying characteristics of fruits and vegetables and surface hardening of samples during drying. *Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery (Nogyo Kikai Gakkaishi)*, **67** (6), 62-70 (折笠貴寛, 田川彰男, 相馬真哉, 飯本光雄, 小川幸春. 青果物の熱風乾燥特性と硬化, 農業機械学会誌).
- 12) Orikasa, T., Shibata, T., Nei, D., Roy, P., Nakamura, N., Shiina, T., and Tagawa, A. (2008). Microwave drying characteristics of sliced radish. *Journal of the Japanese Society of Food Science and Technology (Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi)*, **55** (7), 350-354 (折笠貴寛, 柴田高志, 根井大介, ロイ ポリトッシュ, 中村宣貴, 椎名武夫, 田川彰男. マイクロ波を利用した千切りダイコンの乾燥特性, 日本食品科学工学会誌).
- 13) Ando, Y., Maeda, Y., Mizutani, K., Hagiwara, S., and Nabetani, H. (2016). Effect of air-dehydration pretreatment before freezing on the electrical impedance characteristics and texture of carrots. *Journal of Food Engineering*, **169**, 114-121.
- 14) Uemura, T. and Tagawa, A. (2012). Effect of dehydration method on the physical properties of fresh-cut radish after freezing. *Journal of the Japanese Society of Food Science and Technology (Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi)*, **59** (3), 115-121 (植村泰介, 田川彰男. デハイドロフリーズにおける脱水法がカットダイコンの物理的性質および解凍・復水条件に及ぼす影響, 日本食品科学工学会誌).
- 15) Ando, H., Watanabe, M., Oshita, S., and Suzuki, T. (2008). Effect on osmotic dehydrofreezing on fresh vegetable tissue. *Food Preservation Science (Nihon Shokuhin Hozo Kagaku Kaishi)*, **34** (5), 261-266 (安藤寛子, 渡辺 学, 大下誠一, 鈴木 徹. 生鮮野菜に対する浸透圧脱水凍結法の効果の検討, 日本食品保蔵科学会誌).
- 16) Koide, S., Orikasa, T., Koide, F., Muramatsu, Y., and Tagawa, A. (2016). Moisture content prediction of dried cooked rice during drying, preservation, and water Sorption. *Food Preservation Science (Nihon Shokuhin Hozo Kagaku Kaishi)*, **42** (2), 59-64 (小出章二, 折笠貴寛, 小出冬菜, 村松良樹, 田川彰男. 乾燥米飯の乾燥・保存・吸水における含水率予測, 日本食品保蔵科学会誌).
- 17) Murata, S., Tanaka, F., and Habara, K. (1995). A theory of food freezing. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, **57** (1), 25-32 (村田 敏, 田中史彦, 羽原一宏. 食品の凍結理論, 農業機械学会誌).
- 18) Heiss, R. and Schachinger. (1951). Fundamentals of Freeze-Concentration of Liquids. *Food Technology*, **5** (6), 211-218.
- 19) 松本信二 (2016). 「食品加工貯蔵学 (食品工学基礎講座 6)」, 本間清一, 村田容常編, 東京化学同人, 東京, pp.144-145.
- 20) Sagara, Y. (2004). Fundamentals in Drying of Food Materials (Part 2). *Refrigeration*, **79** (921), 564-570 (相良泰行. 食品乾燥の基礎知識 (その2), 冷凍).
- 21) 松野隆一, 中村厚三, 古田 武, 田門 肇 (1989). 「濃縮と乾燥 (食品工学基礎講座 6)」, 光琳, 東京, pp.175-289.
- 22) Murata, S., Yamasaki, N., and Tanaka, F. (1992). Theoretical analysis of chemical reaction in frozen state - Contribution of the concentration effect to the rate acceleration in the freezing process -. *Journal of the Japanese Society of Food Science and Technology (Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi)*, **39** (11), 972-975 (村田 敏, 山崎信行, 田中史彦. 凍結下の化学反応速度の解析—凍結による濃縮の反応促進効果—, 日本食品工業学会誌).
- 23) 日本冷凍空調学会編 (2013). 「冷凍空調便覧IV巻食品・生物編」, 日本冷凍空調学会, pp.1-86.
- 24) Jia, Y., Khalifa, I., Hu, L., Zhu, W., Li, J., Ki, K., and Li, C. (2019). Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques. *Food and Bioprocess Technology*, **118**, 67-76.
- 25) Kurata, D., Orikasa, T., Komuro, M., Sasaki, K., and Koide, S. (2020). Quality evaluation of shiitake mushrooms dried by vacuum microwave treatment. *Food Science and Technology Research*, **26** (3), 339-350.
- 26) Hawlader, M.N.A., Conrad, O.P., and Tian, M. (2006). Properties of modified atmosphere heat pump dried foods. *Journal of Food Engineering*, **74**, 392-401.
- (令和3年5月18日受付, 令和3年8月30日受理)