

## 絹厚揚げフリーズドライの水戻し条件に関する研究

田口裕美\*, 佐合 徹\*

### Study on Water Rehydration Conditions for Freeze-Dried Deep-Fried Silken Tofu

Hiromi TAGUCHI and Toru SAGO

This study investigated the effects of rehydration conditions on the texture and weight recovery of freeze-dried (FD) deep-fried silken tofu. We compared rehydration in room-temperature water versus 98 °C water to determine the optimal conditions for restoring the original texture. For samples prepared by rapid freezing, a rehydration time of approximately 3 minutes in room-temperature water was found to be optimal. In contrast, samples prepared by slow freezing required a considerably longer time for weight recovery. Therefore, slow freezing was considered unsuitable for commercialization. In both cases, it is difficult to completely restore the original texture, and further improvements in pre-processing during freeze-drying etc are needed.

Keywords: Freeze-Drying, Water Rehydration, Texture, Rapid Freezing, Slow Freezing

#### 1. はじめに

昨今の防災意識の高まりに伴い、災害食の備蓄や見直しが活発化している。災害食は、「日常食の延長線上にあり、室温で保存できる食品及び飲料はすべて災害食となりうる<sup>1)</sup>」と定義される。フリーズドライ食品（以下フリーズドライ）はインスタント食品として長年その市場価値が認識されてきたが<sup>2)</sup>、上記の定義を満たしており、災害食をはじめ介護食、携帯食や観光土産等への市場も見込まれるなど多様な用途に利用できるため、製品開発を検討している県内事業者は多い。フリーズドライを食するにあたり、水戻しする際の条件（時間、水の量、温度等）はその食品特有のものであり、商品開発における課題となっている。また、凍結条件は乾燥工程における効率や最終製品の品質に間接的に影響を及ぼす可能性があるため<sup>3)</sup>、併せて検討することが望ましい。

フリーズドライの適切な復元条件が明らかになれば、単品だけでなく複数の素材を混合した調理

等についても、水戻しする場合の有力な指標の一つとなる。また、幅広い用途における商品開発にもつながる。

そこで、県内企業の主力商品である大豆加工品を対象に、水戻し条件および凍結乾燥条件を変えた場合の食品の物性の違いを比較し、元の食感を損なわずに復元できる条件を検討したので報告する。

#### 2. 実験方法

##### 2.1 予備実験

数種類の冷凍条件で作製したフリーズドライについて予備実験を行い、水戻し 1 分における多機能物性測定装置（山電、RHEONERII）によるテクスチャー解析（ここではかたさ荷重）、および X 線 CT 画像から、作製条件がフリーズドライの内部構造および水戻しに影響を与えることを確認した。そこで、予備実験の結果に基づき、以下の本実験ではフリーズドライ作製において主要な方法である急速冷凍と、通常の冷凍庫で冷凍して作製した場合を想定した緩慢冷凍の 2 条件について

---

\* 食と医薬品研究課

比較・検討を行うこととした。

## 2.2 フリーズドライの作製

図 1 より市販の絹厚揚げを 2 cm 角にカットし、皮面が 3 面と 4 面の 2 種類のサンプルを作製した。その後、以下 2 通りの方法で真空凍結乾燥機にてフリーズドライを作製した。

- ① 凍結温度 $-40^{\circ}\text{C}$ 、乾燥温度 $30^{\circ}\text{C}$ 、温度勾配なしの定値運転（以下、急速冷凍）。
- ② 24 時間かけて $-1^{\circ}\text{C}$ から $-5^{\circ}\text{C}$ を通過し、 $-40^{\circ}\text{C}$ に到達後、 $30^{\circ}\text{C}$ で乾燥 48 時間キープ（以下、緩慢冷凍）。

以上の工程による温度変化を図 2 に示す。

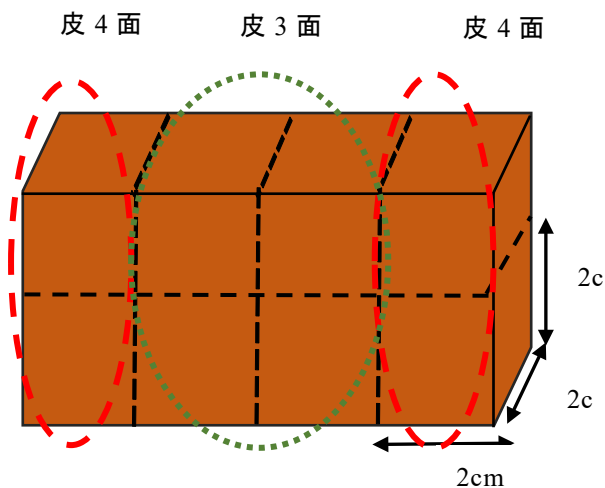


図 1 厚揚げフリーズドライのサンプル作製

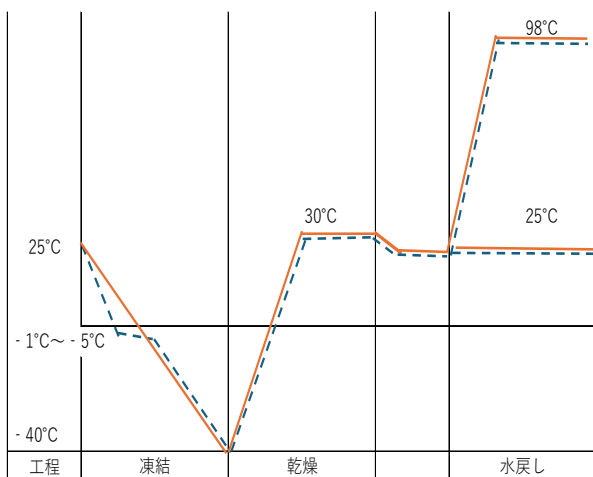


図 2 フリーズドライの真空凍結乾燥と水戻しの工程

直線：急速冷凍 破線：緩慢冷凍

## 2.3 水戻し時間別のかたさ荷重の測定

2.2 で作製したそれぞれのフリーズドライについて、常温水（約 $25^{\circ}\text{C}$ ）または $98^{\circ}\text{C}$ 水で 1, 2, 3, 4, 5, 10, 30, 40 分間水戻しした場合におけるテクスチャー解析を行い（ $\phi 16\text{ mm}$  直径の円柱型プランジャー使用）、かたさ荷重 [N] を乾燥前と比較した（図 3）。ここでのかたさ荷重とは、サンプルをプランジャーに押し付けて、サンプルの高さの 50 % まで圧縮したときの押し返す力（最大荷重）を示す。なお、荷重を加えるのはサンプルの皮面ではない面である。



図 3 レオメーターにおけるテクスチャー測定（かたさ荷重の測定）

（注）底面が皮部分

荷重をかけるのは皮面ではない

## 2.4 水戻し後の重量復元率

凍結乾燥前の重量に対する水戻し時間別の重量復元率を測定し、元の重量に近くなる水戻し時間を調査した。

## 2.5 表皮の違いがかたさ荷重と重量復元率に与える影響

皮面（揚げ面）が水戻しに影響を与える可能性が考えられたため、皮面の数が異なる試料（3 面または 4 面）について、それぞれ水戻し後のかたさ荷重と重量復元率に違いがあるかを確認した。

## 2.6 X 線 CT システムによる断面図の空隙比較

元の重量に近くなる水戻し時間後の断面図を X 線 CT システムで比較し、フリーズドライ内部の空隙と水戻し条件の関係を検討した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 かたさ荷重

##### 3.1.1 急速冷凍

急速冷凍で作製したフリーズドライを常温水で水戻ししたときのかたさ荷重は、表 1 および図 4-1 によると皮 3 面では水戻し時間が 2 分以上で、表 1 および図 4-2 によると皮 4 面では 2 分以上で凍結乾燥前より小さくなったことから、この水戻し時間で元のかたさより軟らかくなったと言える。

98℃で水戻ししたときのかたさ荷重は、表 1 および図 4-1 によると皮 3 面では水戻し時間が 1 分以上で、表 1 および図 4-2 によると皮 4 面では 1 分以上で凍結乾燥前より小さくなったことから、この水戻し時間で元のかたさより軟らかくなったと言える。

##### 3.1.2 緩慢冷凍

緩慢冷凍で作製したフリーズドライを常温水で水戻ししたときのかたさ荷重は、表 2 および図 5-1 によると皮 3 面では水戻し時間が 10 分以上で凍結乾燥前より小さくなり、表 2 および図 5-2 によると皮 4 面では 40 分でも凍結乾燥前より小さくならなかった。

98℃で水戻ししたときのかたさ荷重は、表 2 および図 5-1 によると皮 3 面では水戻し時間が 2 分以上で凍結乾燥前より小さくなり、表 2 および図 5-2 によると皮 4 面では 40 分でも凍結乾燥前より小さくならなかった。

#### 3.2 重量復元率

##### 3.2.1 急速冷凍

急速冷凍で作製したフリーズドライの重量復元率は、表 1 および図 4-3 によると常温水では水戻し時間 3 分、表 1 および図 4-4 によると 98℃水では 2 分で約 80%に達し、それ以降はほぼ横ばいであった。

##### 3.2.2 緩慢冷凍

緩慢冷凍で作製したフリーズドライの重量復元率は、表 2 および図 5-3 によると常温水では 40 分後でも 70-80%程度であった。表 2 および図 5-4 によると 98℃水では 10 分で約 80%に達し、30 分後には 90%以上に達した。

#### 3.3 表皮の違いがかたさ荷重と重量復元率に与える影響

##### 3.3.1 急速冷凍

急速冷凍で作製したフリーズドライについて皮

3 面および 4 面の試料を比較したとき、表 1 によると皮 4 面の方がかたさ荷重は大きく、重量復元率は大きい傾向にあった。このことより、皮部分は水吸収がよく重量は増えるが、内部まで浸透しないと考えられる。

##### 3.3.2 緩慢冷凍

緩慢冷凍で作製したフリーズドライについて皮 3 面および 4 面の試料を比較したとき、表 2 によると皮 4 面の方がかたさ荷重は大きく、重量復元率は小さい傾向にあった。このことより、緩慢冷凍では急速冷凍の場合と比べて皮部分の水吸収はよくないと考えられる。

#### 3.4 X 線 CT システムによる断面図の空隙比較

以上の実験結果の違いについて考察するため、X 線 CT システムによってフリーズドライ内部の断面を比較した結果を図 6 に示す。なお、図の淡色部分は絹厚揚げ、濃色部分は水戻しにより水分が吸収された箇所、黒点は空隙であると考えられる。

##### 3.4.1 かたさ荷重との関係

緩慢冷凍で作製したフリーズドライは急速冷凍で作製したものに比べ、内部の空隙が大きい傾向が見られた。この構造的な差異が、緩慢冷凍が元の食感に戻りにくいこと的主要原因であると推察される。そのメカニズムとして、以下が考えられる。

- 1)空隙が粗く構造が不均一であるため、水が奥深くまで均一に浸透しにくい。
- 2)凍結速度が低い場合、細胞外の溶液が先に凍り始め、細胞外において生成された氷結晶は隣接する細胞内の水分を吸収するため、細胞内は脱水・収縮されると共に、氷結晶が大きく成長する<sup>4)</sup>。さらに、氷結晶生成と凍結濃縮によって強固な網目構造ができる<sup>5)</sup>。

以上の要因が複合的にかたさ荷重に影響を与えていると考えられる。

##### 3.4.2 重量復元率との関係

急速冷凍で作製したフリーズドライは全体的に水が浸透しているのに対し、緩慢冷凍で作製したフリーズドライは水が浸透していない淡色部分が不規則に見られるが、これは不均一な内部構造による水の浸透しにくさが影響していると推察される。また、図 4-3、4-4 によると急速冷凍では重量

復元率は水温による影響を受けにくく、図 5-3, 5-4 によると緩慢冷凍では水温による影響を受けやすい傾向が見られた。この一因として、高温によ

り内部構造に変質や軟化等が生じ、その影響を受けている可能性が考えられる。

表 1 急速冷凍の測定結果※1

| 常温水戻し |     |             |          | 98℃水戻し      |          |
|-------|-----|-------------|----------|-------------|----------|
| 水戻し   | 皮面数 | かたさ荷重[N] ※2 | 重量復元率(%) | かたさ荷重[N] ※2 | 重量復元率(%) |
| 凍結乾燥前 | 3   | 2.00±0.06   |          | 2.00±0.06   |          |
|       | 4   | 1.84±0.17   |          | 1.84±0.17   |          |
| 1 分   | 3   | 2.18±0.13   | 61.21    | 1.58±0.43   | 70.98    |
|       | 4   | 2.16±0.32   | 64.39    | 1.55±0.23   | 78.34    |
| 2 分   | 3   | 1.63±0.09   | 65.44    | 1.24±0.04   | 83.38    |
|       | 4   | 1.76±0.38   | 68.25    | 1.39±0.11   | 84.27    |
| 3 分   | 3   | 1.00±0.17   | 83.38    | 1.36±0.10   | 88.92    |
|       | 4   | 1.17±0.11   | 93.18    | 1.45±0.10   | 89.02    |
| 4 分   | 3   | 1.36±0.16   | 79.16    | 1.20±0.08   | 93.40    |
|       | 4   | 1.00±0.25   | 89.91    | 1.42±0.27   | 99.41    |
| 5 分   | 3   | 1.00±0.25   | 85.22    | 1.2±0.06    | 91.29    |
|       | 4   | 1.33±0.20   | 91.39    | 1.31±0.09   | 94.66    |
| 10 分  | 3   | 1.10±0.05   | 92.61    | 0.93±0.16   | 94.20    |
|       | 4   | 1.32±0.14   | 93.77    | 1.09±0.11   | 97.92    |
| 30 分  | 3   | 1.01±0.10   | 98.42    | 1.04±0.06   | 97.36    |
|       | 4   | 1.04±0.11   | 104.15   | 1.19±0.05   | 103.86   |
| 40 分  | 3   | 1.15±0.03   | 90.50    | 1.09±0.16   | 96.04    |
|       | 4   | 1.22±0.25   | 98.81    | 1.38±0.02   | 108.01   |

(注) ※1 N=5

※2 平均値±標準誤差

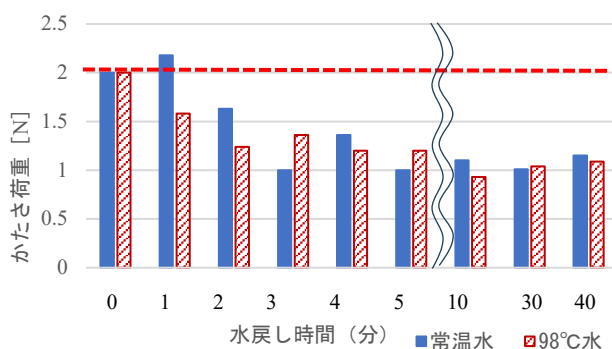


図 4-1 急速冷凍の水戻し時間別かたさ荷重 [N] (皮 3 面)  
破線は凍結乾燥前のかたさ荷重

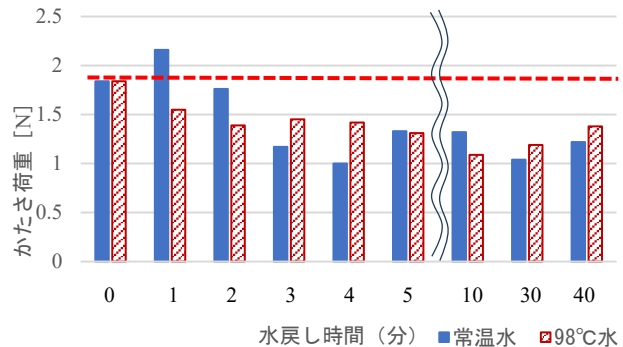


図 4-2 同水戻し時間別かたさ荷重 [N] (皮 4 面)

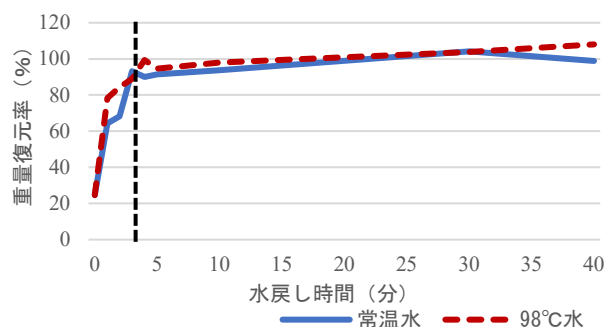
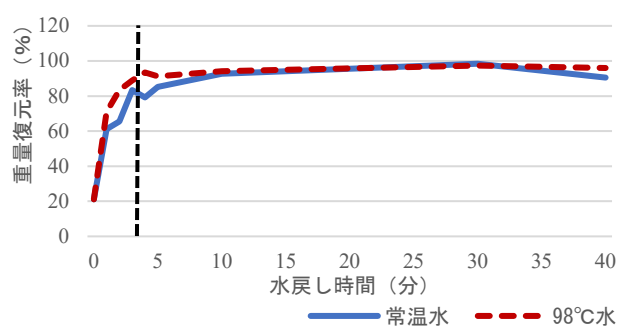


図 4-3 急速冷凍の水戻し時間別重量復元率 (%) (皮 3 面) 図 4-4 同水戻し時間別重量復元率 (%) (皮 4 面)  
縦破線は水戻し 3 分の重量復元率

表 2 緩慢冷凍の測定結果<sup>※1</sup>

| 常温水戻し |     |                        |          | 98℃水戻し                 |          |
|-------|-----|------------------------|----------|------------------------|----------|
| 水戻し   | 皮面数 | かたさ荷重[N] <sup>※2</sup> | 重量復元率(%) | かたさ荷重[N] <sup>※2</sup> | 重量復元率(%) |
| 凍結乾燥前 | 3   | 2.00±0.06              |          | 2.00±0.06              |          |
|       | 4   | 1.84±0.17              |          | 1.84±0.17              |          |
| 1 分   | 3   | 19.61±0.21             | 36.15    | 2.67±0.31              | 51.72    |
|       | 4   | 17.77±2.27             | 36.80    | 4.00±0.87              | 48.07    |
| 2 分   | 3   | 2.93±1.39              | 60.16    | 1.74±0.34              | 70.18    |
|       | 4   | 4.87±1.30              | 48.66    | 4.03±0.46              | 52.23    |
| 3 分   | 3   | 3.85±0.97              | 53.83    | 2.00±0.16              | 62.53    |
|       | 4   | 5.14±0.58              | 49.55    | 3.76±0.80              | 60.53    |
| 4 分   | 3   | 2.37±0.27              | 59.63    | 1.60±0.12              | 83.11    |
|       | 4   | 7.21±1.51              | 49.55    | 4.17±0.92              | 57.86    |
| 5 分   | 3   | 2.11±0.16              | 62.27    | 1.68±0.20              | 71.50    |
|       | 4   | 4.08±0.67              | 55.79    | 3.62±0.42              | 60.24    |
| 10 分  | 3   | 1.98±0.20              | 67.55    | 2.16±0.43              | 84.70    |
|       | 4   | 3.90±0.61              | 61.13    | 3.04±0.17              | 79.23    |
| 30 分  | 3   | 1.70±0.22              | 79.95    | 1.55±0.35              | 94.20    |
|       | 4   | 3.17±0.63              | 65.28    | 2.91±0.43              | 103.26   |
| 40 分  | 3   | 1.60±0.20              | 84.96    | 1.69±0.22              | 97.89    |
|       | 4   | 2.80±0.42              | 71.22    | 2.55±0.61              | 91.99    |

(注) <sup>※1</sup> N=5

<sup>※2</sup> 平均値±標準誤差

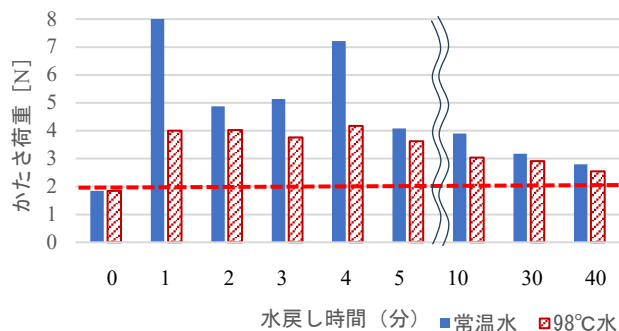
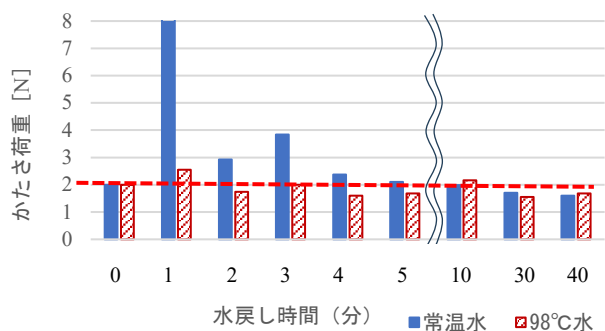


図 5-1 緩慢冷凍の水戻し時間別かたさ荷重 [N] (皮 3 面)  
破線は凍結乾燥前のかたさ荷重

図 5-2 同水戻し時間別かたさ荷重 [N] (皮 4 面)

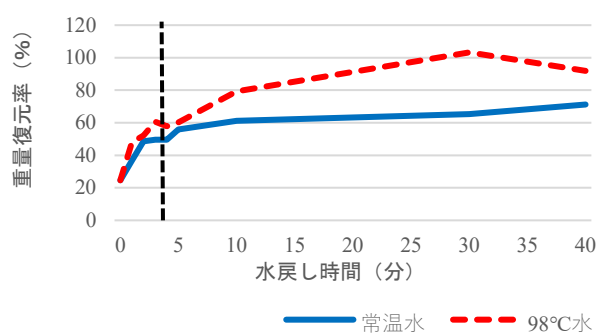
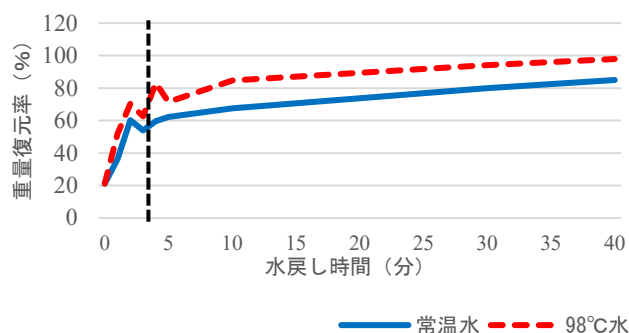


図 5-3 緩慢冷凍の水戻し時間別重量復元率 (%) (皮 3 面)  
縦破線は水戻し 3 分の重量復元率

図 5-4 同水戻し時間別重量復元率 (%) (皮 4 面)

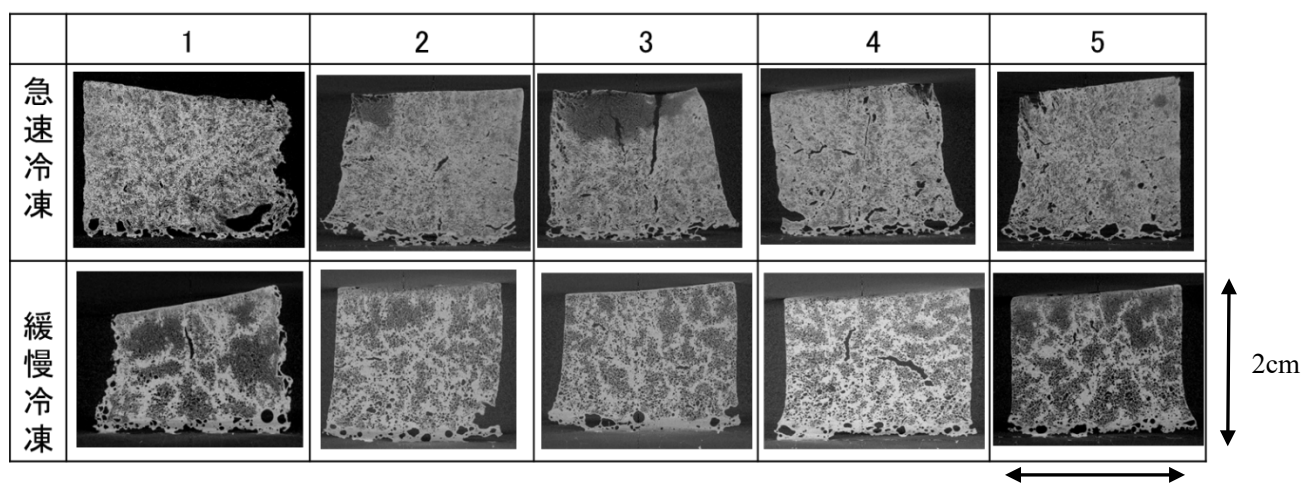


図 6 X 線 CT システムによるフリーズドライ内部の断面図 (皮 3 面, N=5)

常温水戻しによる重量復元率約 80 % のとき (急速冷凍 : 水戻し 3 分後, 緩慢冷凍 : 水戻し 40 分後)  
上面は皮面ではない, 下面は皮面。

#### 4. 結論

かたさ荷重および重量復元率から考えられる復元に適した水戻し時間は、急速冷凍で作製したフリーズドライでは常温水で 3 分程度と考えられるが、完全に元の食感を損なわずに復元することは難しい。また、緩慢冷凍で作製したフリーズドライは重量復元にかなりの時間を要するため、商品化には適さないと考えられる。厚揚げは外皮と内部で水吸収の速度や時間に差異が生じる傾向があるため、フリーズドライ作製における前処理等の工夫の検討が今後の課題として挙げられる。

#### 参考文献

1) 守 茂昭：“防災における「食」の現状について”．  
東日本大震災特別論文集，No.4，p33-36(2015)

- 2) 中川究也：“食品凍結乾燥のプロセス開発とモデル化に関する研究”．日本食品工学会誌，26(1)，p1-9(2025)
- 3) 上西浩史ほか：“食品凍結乾燥の基礎知識と実用技術への展開(1)”．冷凍，79(922)，p26-32(2004)
- 4) 安藤泰雅ほか：“食品の冷凍および解凍に関する技術開発の現状と今後の課題”．日本食品科学工学会誌，64(8)，p391-428(2017)
- 5) 小林りか：“冷凍エージング下の凍り豆腐内で生ずる品質変化”．低温生物工学会誌，67(2)，p99-102(2021)

(本研究は、法人県民税の超過課税を財源として  
おります。)