

生食用トマトの規格外品を有効利用するための 乾燥特性評価および乾燥方法

上村 聡*, 佐合 徹*

Evaluation of Drying Characteristics and Drying Method for Effective Utilization of Non-Standard for Fresh Market Tomatoes

Sou UEMURA and Toru SAGO

There is a major production area of fresh market tomatoes in the Hokusei region of Mie prefecture, but some of the tomatoes are not shipped as non-standard products. In this research, we selected drying as the primary processing method to utilize these tomatoes, and clarified that the drying characteristic is constant rate drying up to about 400 % (d.b.). The relationship between water activity and weight change showed that it is difficult to judge the end of drying by weight change, but it is possible to judge by product temperature. Furthermore, the color change of tomatoes during drying was also determined. Based on these results, we found that the color of tomatoes did not deteriorate when dried at 100 °C up to 400 % (d.b.), which is the critical moisture content, in order to increase the drying rate and improve production efficiency while maintaining the color. On the other hand, during the reduced rate drying period, when the moisture content is lower than the critical moisture content, browning is observed as the drying temperature increases, and it is important to dry under 60 °C.

Keywords: Fresh Market Tomato, Non-Standard Product, Hot Air Drying, Drying Characteristics, Drying Rate, Color Characteristics of Drying Tomato

1. はじめに

三重県では木曾岬町を中心に、北勢地域の冬春トマトが国の指定産地となっており¹⁾、生食用として販売されている。野菜の中ではキャベツに次いで生産量が多く、重要品目となっている²⁾。令和3年産は9,670トンが収穫される一方、出荷量は8,320トンであり、収穫量の約14%に当たる1,350トンが出荷されずに廃棄されている²⁾ことから、これら未利用の出荷規格外品の活用を進めていく必要がある。

しかし、出荷規格外品は発生量が不安定であるため、最終製品化する前に一次加工して素材化する過程が必要となる。トマトの一次加工の方法と

してはピューレ化、冷凍、乾燥等が一般的である。水分の多いトマトは乾燥すれば質量がおよそ20分の1になり、輸送・保存に有利であること、濃縮の必要がないことから、乾燥品は二次加工品の原料として活用できる場面は多いと思われる。乾燥方法としては凍結乾燥、熱風乾燥、噴霧乾燥、マイクロ波等、様々な方法が挙げられる³⁾。このうち、凍結乾燥は水戻しした場合の復元性に優れ、風味も良いことから、インスタント食品に多く使用されている⁴⁾。また、熱風乾燥は簡易で導入コストも低いことから、高水分な青果物の乾燥に広く利用されている⁵⁾。本研究では予備試験において、トマトの乾燥に凍結乾燥を用いたところ、図1に示すようにリコピンが変化して白色化したものの、熱風乾燥では色彩が保たれたため、トマトの場合

* 食と医薬品研究課

は熱風乾燥が適していると考えられる。

トマトの熱風乾燥について、先行研究では一次加工方法としてトマトの乾燥特性が明らかにされている⁶⁻⁸⁾が、そのほとんどが加工用品種を対象としたものであり、生食用品種における乾燥特性は明らかになっていない。また、乾燥品を製造する場合の保存性を判断する指標として水分活性の測定が挙げられるが、高額な専用の機器が必要である。製造現場では高額機器を使用せずに質量等を基準とした簡易な測定により乾燥終了の判断ができることが求められている。さらに、色彩を保持しながら、生産効率を向上させるために、乾燥時間を短縮させることも求められている。

そこで、本研究では、トマトの乾燥品の製造において上記の課題を解決する事に取り組んだ。乾燥方法として熱風乾燥を選択し、生食用のトマトを試料として複数の温度帯で乾燥特性および水分活性と質量変化の関係を明らかにすること、さらに色彩の変化を指標として乾燥速度を向上できる条件を検討したので、その結果を報告する。



図1 トマトの乾燥品の写真

左：凍結乾燥 右：熱風乾燥(60℃, 18h)

2. 実験方法

2.1 供試果実

実験には、三重県農業研究所のハウスで栽培されたトマト（品種：りんか、栽培法：ロックウールを用いた水耕栽培）を使用した。令和4年12月12日、令和5年1月13日に収穫されたトマトを常温で保存し、それぞれ10日以内に実験に供した。

2.2 試料の調整

試料の調整は、以下のとおり行った。トマトのヘタを包丁で除去し、水平に10mmの厚さにスライスし、試料とした。乾燥は定温送風乾燥機（WFO-1001SD, 東京理化機械, 風速1~2m）を

用いて、乾燥温度60, 80, および100℃の3試験区で実施した。乾燥に際し、ステンレス製網バットの上にテフロン網を敷き、その上に試料500gを重ならないように並べた。なお、乾燥温度60℃, 80℃の条件では、質量が減少しなくなるまで10時間以上かける必要があったため、一時的に密封して冷蔵による休止を挟んで2日間連続で乾燥を行った。また、熱風乾燥中の庫内温度、試料の中心温度はステンレス保護管センサ（直径2mm, 長さ70mm, TR-1320, 株式会社ティアンドデイ）を用いて1分毎に測定し、データロガー（TR-71wf, 株式会社ティアンドデイ）にて記録した。

2.3 含水率、乾燥特性曲線の定義と算出方法

湿量基準含水率（wet basis 以下、含水率(w.b.))及び乾量基準含水率（dry basis 以下、含水率(d.b.))を算出するため、試料は収穫日ごとにトマト5個体を用いて含水率を測定した。食品の含水率を表す際は、一般的に湿量基準含水率(w.b.)を用いる。しかし、乾燥の場合は全体質量が減少し、分母が変化するため、水分の変化を計算するには不便であり、乾燥が進行しても変化しない完全乾燥固体（bone dry material）の質量を基準に準含水率(d.b.)を算出する事が多い。

完全乾燥固体の質量は日本食品標準成分表2020年版（八訂）分析マニュアル⁹⁾に従い、乾燥助剤としてケイ砂を用いた常圧加熱乾燥法により、乾燥温度110℃、乾燥時間5時間とした。

生質量をW、完全乾燥固体の質量をW₀とし、含水率(w.b.)、及び含水率(d.b.)は次の式で求めた。

$$\text{含水率(w.b.)}(\%) = \frac{W - W_0}{W} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{含水率(d.b.)}(\%) = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

生の試料1kgあたりにおける、1時間あたりの水の減少量〔H₂O-g kg⁻¹ h⁻¹〕を乾燥速度とした。時刻tにおける乾燥速度をv(t)とし、「ある時刻(t)における試料の質量w(t)」-「時刻tの1時間前(t-1)における試料の質量w(t-1)」の差はすべて水の蒸発とみなし、

$$V(t) (\text{H}_2\text{O-g kg}^{-1} \text{ h}^{-1}) = w(t-1) - w(t) \quad (3)$$

で算出した。横軸にその時刻tにおける含水率(d.b.)を、乾燥速度を縦軸にプロットして、乾燥特

性曲線を作成した。

2.4 試料の物性測定方法

2.4.1 乾燥による質量変化

電子天秤 (Mettler PM34, DeltaRange) を使用し、1 時間毎にステンレス製バットごと、質量を測定した。

2.4.2 水分活性

トマトの乾燥品は水分活性測定装置 (Hygroskop DT 型, Rotronic) を用いて測定した。試料を刻んで 1 g 採取し、専用の容器に入れ、25 °C で 1 時間静置し、平衡状態になった後測定した。試料は乾燥 1 時間毎に採取し、経時変化を計測した。

2.4.3 乾燥物の色調

トマトの乾燥品は分光測色計 (CM-700d, コニカミノルタ) を用いて測定し、 $L^*a^*b^*$ 表色系にて評価した。1 時間毎にステンレス製バット 1 つにつき、試料 5 個の色をガラス付き 8 mm ターゲットマスクを用いて、SCE (正反射光除去)、視野角 10°, 主光源 D 65, 自動平均 3 回にて測定した。

色差 ΔE は乾燥開始時の試料を基準とし、次の式によって算出した。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

2.5 乾燥時間を短縮できる条件の検討

後述する 3.1 節、3.2 節、3.3 節の結果から、品質としてトマトの色彩を悪化させることなく、効率的に乾燥トマトを生産する条件を検討した。限界含水率まで 100 °C で 5 時間を予備乾燥とし、それ以降を 60 °C で仕上げ乾燥する方法について 60 °C での乾燥を対象区とし、2.4 節の方法で物性を測定し、比較した。

3. 結果と考察

3.1 乾燥特性

10 mm の厚さでスライスしたトマト 500 g を 60 °C、80 °C および 100 °C で乾燥させた場合の試料の含水率 (d.b.) の変化を表す、乾燥速度曲線を図 2 に示す。一般的に熱風乾燥による乾燥速度曲線は、恒率乾燥期間で直線的に、減率乾燥期間では下に凸の曲線を示すとされており¹⁰⁾、図 2 を見る限り、全ての乾燥温度で含水率 (d.b.) 500 % 程度までは直線的で恒率乾燥を、それ以下の含水率では下に凸であり、減率乾燥を示していると思われた。

次に、図 2 の乾燥速度曲線から 2.3 節の方法により、乾特特性曲線を求め、図 3 に示す。乾燥開始時の含水率 (d.b.) は約 2,430 % であり、含水率 (d.b.) が約 2,430 % におけるプロットは、乾燥開始～1 時間経過時点までの平均乾燥速度を示している。いずれの温度帯においても、乾燥開始からの 1 時間より、1 時間経過時から 2 時間経過時までの 1 時間の方が乾燥速度は大きかった。乾燥開始時に試料の温度は熱風の温度より低く、乾燥開始後に試料の温度が上昇する。試料の温度上昇に伴い、乾燥速度が増大するため、乾燥開始から 1 時間経過時までの 1 時間に比べ、1 時間経過時から 2 時間経過時までの 1 時間の方が乾燥速度は大きくなる。この初期の乾燥速度が向上する期間は、予熱期間と呼ばれる。

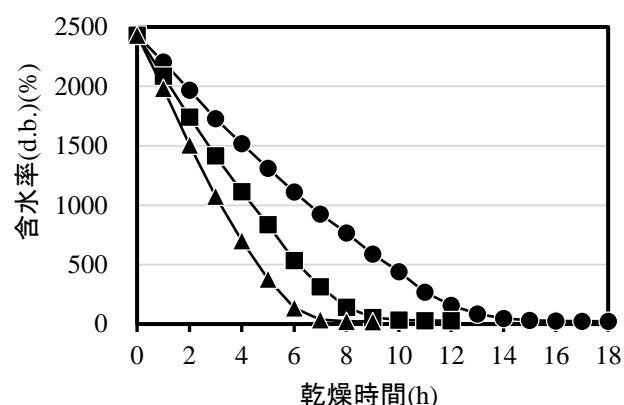


図 2 乾燥速度曲線

(● : 60 °C, ■ : 80 °C, ▲ : 100 °C) (n = 5, SD は省略)

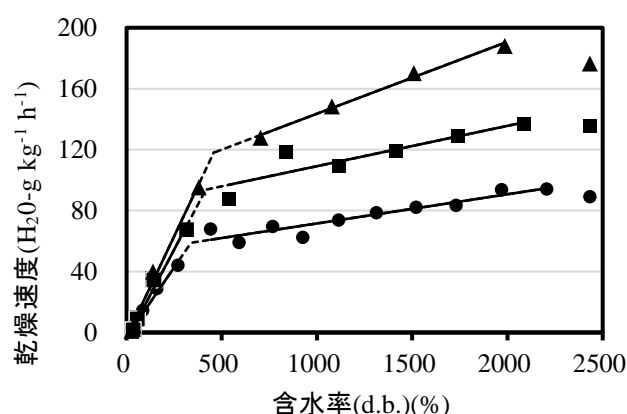


図 3 乾燥特性曲線

(● : 60 °C, ■ : 80 °C, ▲ : 100 °C) (n = 5, SD は省略)

図3においてその後、乾燥速度は一定ではなく含水率(d.b.)約400%を境として2段階で減少する事が観察され、この乾燥速度の減少は減率乾燥の特徴とされている⁹⁾。一般的には、トマトのように水分の多い青果物は乾燥開始後に表面の水分が充分にあり、蒸発量が変わらないために恒率乾燥になるとされている^{6,8)}。しかし村田らは水分が多く、恒率乾燥であるはずの馬鈴薯、大根において乾燥による試料収縮に伴う蒸発面積の減少により、“見かけ上”減率乾燥の様相を示すと報告している^{11,12)}。その他、折笠ら、中村らもサツマイモ、ナス、調理用トマトでそれを支持している⁶⁻⁸⁾。

また、減率乾燥は一般的に内部から表面への水分移行が蒸発速度に追いつかず、乾燥速度が減少して表面が乾燥し、硬化する⁴⁾とされている。しかし本研究では、目視による観察で含水率(d.b.)約400%までは表面は乾燥せず、湿った状態であったため、少なくとも含水率(d.b.)約400%までは表面の乾燥・硬化による減率乾燥とは考えにくい。また、減率乾燥期間は品温が上昇する事が報告されているが¹²⁾、本研究では、品温は含水率(d.b.)約400%までほぼ一定であり、その後、上昇する傾向が見られた。したがって、品温の観点からも含水率(d.b.)約400%までは恒率乾燥である事を支持している。その一方、トマトは乾燥に伴い徐々に収縮する事が観察され、これは乾燥面積の減少による乾燥速度の低下の原因となる。これらを総合すると、本研究では乾燥開始から含水率(d.b.)約400%までの範囲では他の報告⁶⁻⁸⁾と同様、いずれの乾燥温度においても試料の収縮を原因とした“見かけ上”の減率乾燥となったが、実際には恒率乾燥であると考えられる。

その後、含水率(d.b.)約400%以下から、目視による観察で試料の表面において乾燥が確認できた。同時に減率乾燥期に特徴的な品温の上昇も観察されたことから、含水率(d.b.)400%程度以下では“見かけ上”も“実際”にも、減率乾燥となっていると考えられる。

図3に示したこれらの乾燥特性曲線から、恒率乾燥期間と減率乾燥期間をそれぞれ直線で近似し、その交点を限界含水率とした。限界含水率は、恒率乾燥から減率乾燥への移行点における含水率と定義されている¹³⁾。限界含水率(d.b.)は、60℃、80℃および100℃では、それぞれ337%、415%

および458%であった。

3.2 水分活性と質量変化

水分活性はある温度における純水の水蒸気圧に対する、対照となる食品を入れた密閉容器内の水蒸気圧の比と定義され、食品の保存性の指標として用いられる。一般的に、その水分活性が0.65以下ではカビの発生はなく、0.5以下では微生物は繁殖しないとされている³⁾。乾燥野菜を製造する場合はこの水分活性値が0.5以下とすることが目安になる。

図4に60℃、80℃および100℃で乾燥した場合の乾燥前の質量に対する各乾燥段階での質量比に対する水分活性の変化を示す。本研究では、いずれの乾燥温度においても質量が乾燥前の10%になった時点でも水分活性は0.9以上あり、自由水が多い事が示唆された。乾燥が進み、終盤に水分活性は急激に低下し、質量比約6%の時点で水分活性は0.5となり、質量比約5%で水分活性は0.3であった。

佐藤らは^{14,15)}干しブドウ作製の目安として水分活性が0.8となるのは質量比で25%になった時と報告しているが、本研究では質量比20%でも水分活性は0.95以上であり、生食用トマトはブドウよりも高い水分活性を維持し、質量比10%程度から急激に水分活性が低下した。これはトマトがブドウに比べて糖が少なく、水分が多い事が原因と推測される。

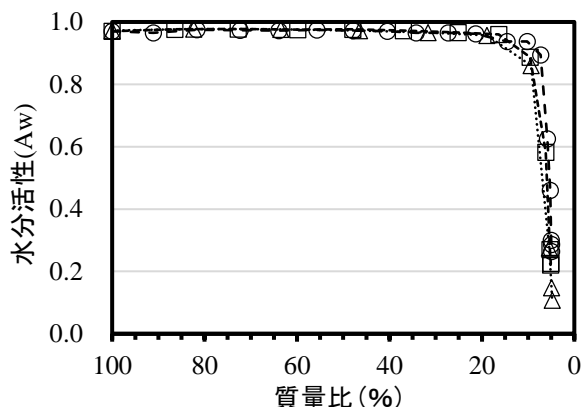


図4 水分活性の変化

(○: 60℃, □: 80℃, △: 100℃) (n=5, SDは省略)

このように、10%以下の質量比では水分活性との相関直線は傾きが急であり、算出した質量比の

わずかな誤差が、推定される水分活性では大きな誤差となる可能性がある。また、生食用トマトにおいて、品種の違いや、栽培環境によって品質が異なる事から、傾きの大きいこの関数はより誤差が大きくなる可能性が考えられる。従って、製造現場において質量比から水分活性を正確に推定するのは困難である。

そのため、水分活性を推定できるデータとして、図 5a~c に 60 °C、80 °C および 100 °C の条件で乾燥した場合の水分活性と品温を示す。いずれの乾燥温度においても水分活性が低下し始めると同時に品温の上昇が観察され、水分活性と品温にはある程度の相関が見られた。このことから、水分活性を推定するには、質量変化よりも品温の変化が目安になると考えられる。また、水分活性が低下し始める時点は、限界含水率に達した時点とほぼ一致した。なお、1 時間に 1 度、2.4 節の測定を行ったために、それに伴い一時的に品温の低下が観察された。

3.3 色彩の変化

60 °C、80 °C および 100 °C で乾燥させた場合のトマトの色差 ΔE の経時変化を図 6 に示す。全ての温度帯において、乾燥開始から 5 時間程度は色差が大きくなっている。これは乾燥に伴って水分が減り、リコピン等の色素が濃縮されているためと思われる、この間は褐変が観察されなかった。この乾燥品を図 7 に示す。目視では 100 °C で 6 時間後から、80 °C では 10 時間後から褐変が観察され、60 °C では褐変しなかった。

これらの褐変が始まった時点は、水分活性が低下した点と一致し、品温が上昇した(図 5a-c 参照)事から、温度依存性が高い反応と思われる。これらの結果から、80 °C、100 °C 一定での乾燥は色彩の変化が大きく、商品性を低下させると考えられる。しかし、80 °C、100 °C で乾燥させても、乾燥開始から限界含水率までは褐変しない事も示された。

3.4 乾燥温度の検討

3.1 節、3.2 節および 3.3 節の結果から、限界含水率までは 80-100 °C の高温で乾燥させ、その後は 60 °C 以下に温度を下げて褐変を防ぎながら仕上げを行う方法が良いと考えられた。そこで、限界含水率まで 100 °C で 5 時間を予備乾燥とし、それ

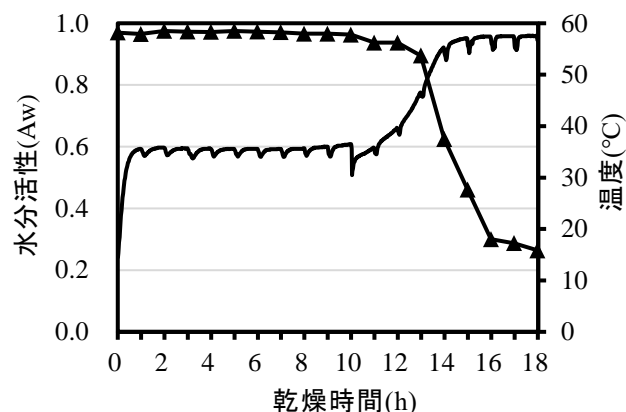


図 5a 60 °C で乾燥した時の水分活性と品温の変化
(▲ : 水分活性, 太線 : 品温)

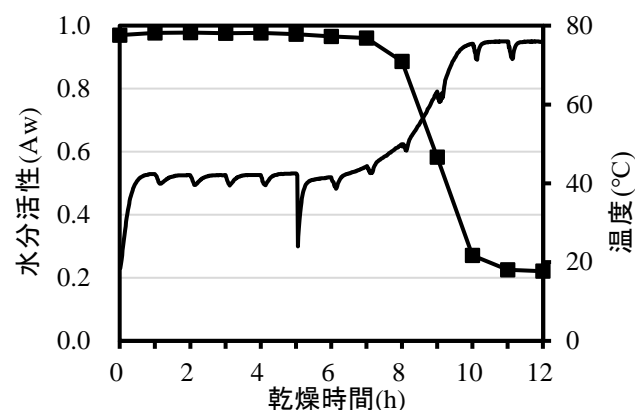


図 5b 80 °C で乾燥した時の水分活性と品温の変化
(■ : 水分活性, 太線 : 品温)

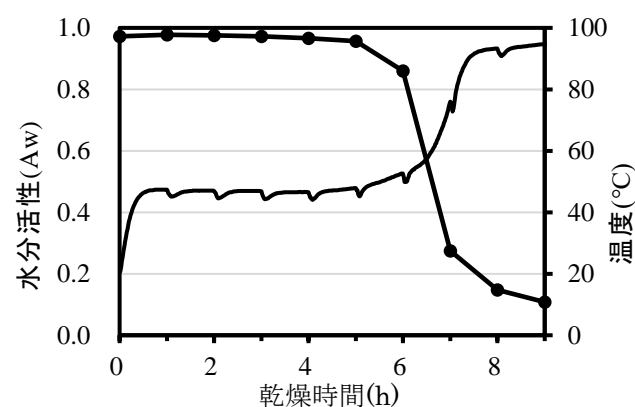


図 5c 100 °C で乾燥した時の水分活性と品温の変化
(● : 水分活性, 太線 : 品温)

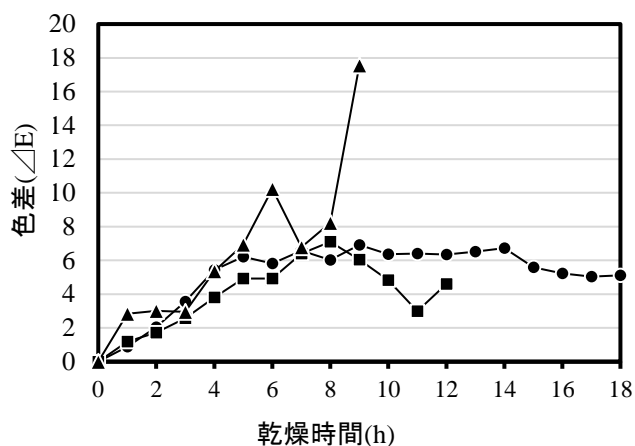


図 6 乾燥中のトマトの色差の経時変化
(●: 60°C, ■: 80°C, ▲: 100°C) (n=25, SD は省略)

以降を 60°C で仕上げ乾燥した場合の水分活性の経時変化を図 8 に示す。水分活性が 0.5 を下回ったのは、100°C で予備乾燥した場合で 8 時間、60°C では 15 時間であった。その後、0.3 以下になったのは開始からそれぞれ 10 時間後、16 時間後であった。その乾燥品の測色の結果を、60°C 一定を基準として色差を算出し、表 1 に表す。100°C で予備乾燥する方法は 60°C 一定と比較して色差が

3.47 であった。一般的には色差 3.2 未満はほとんど気付かないレベルの色差とされており¹⁶⁾ 基準とした 60°C 一定での乾燥品と比較して、目視ではほとんど差がないように見えた。この乾燥品を図 7 に示す。最初は 100°C で、限界含水率以下では 60°C で乾燥させるこの方法は、目視でも 60°C での乾燥品と差がないように見える。この方法は、色彩を悪化させる事なく 60°C 一定で乾燥させる方法と比べて約 6 割の時間で作製することができ、有効であると考えられる。

4. 結論

本研究では、生食用トマトの乾燥特性を明らかにした。限界含水率は含水率(d.b.) 約 400% であり、それまでは恒率乾燥、それ以降は減率乾燥となる。また、質量比 10% 以下では推定される水分活性の誤差が大きく、簡便な質量測定から水分活性の判断は難しいが、品温の上昇するタイミングが乾燥終了の目安になる。また、限界含水率以下になると急激に品温が上昇し褐変が進行する。従って、色彩を保持した商品性の高い乾燥トマトを製造する場合は、限界含水率まで高温で乾燥させて生産速度を向上させ限界含水率以下では 60°C 以下で乾燥する事が重要である。

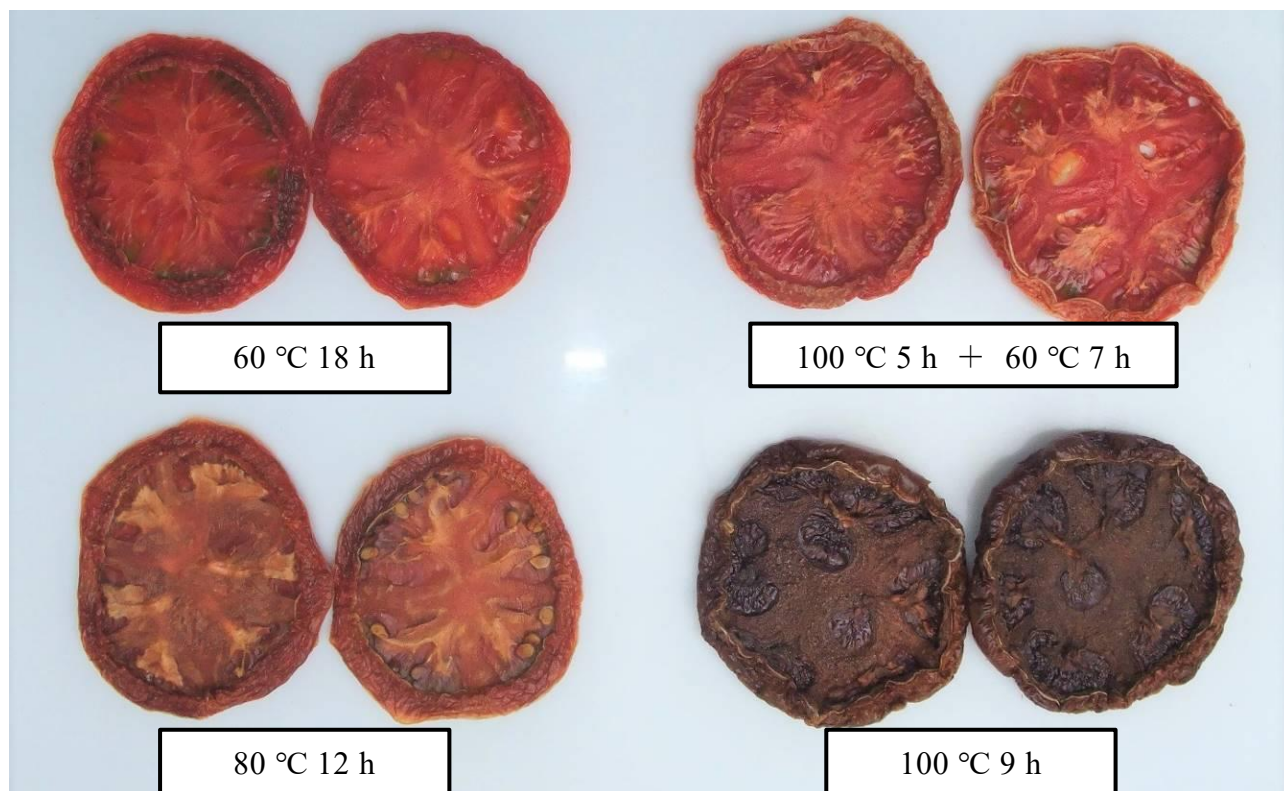


図 7 生食用トマトの乾燥品の比較

表 1 乾燥条件による測色の結果と、目視による観察結果

乾燥条件	L*	a*	b*	色差	目視
60 °C 16 h	37.2	29.3	17.3	0.00	鮮やかな赤色
80 °C 10 h	40.2	27.3	21.3	5.38	やや褐変
100 °C 7 h	40.6	25.3	22.5	7.33	かなり褐変
100 °C 5 h + 60 °C 7 h	40.1	28.9	19.2	3.47	濃い赤色

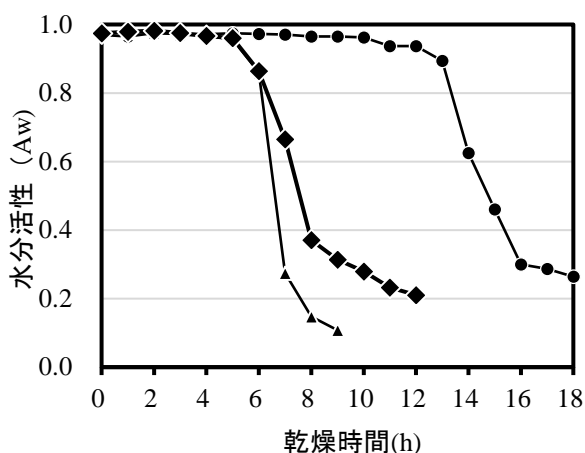


図 8 乾燥中のトマトの水分活性の経時変化
 (●: 60 °C一定, ▲: 100 °C一定, ◆: 100 °C
 で 5 時間予備乾燥させ, 60 °C で 7 時間仕
 上げ乾燥) (n = 2, SD は省略)

謝辞

本研究において、多大なご協力を賜りました三重県農業研究所の磯山主査研究員はじめ、野菜園芸研究課の皆さまに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 東海農政局：“野菜の生産消費”.
<https://www.maff.go.jp/tokai/seisan/engei/yasai/>
- 2) 農林水産省：“作況調査（野菜）”.
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_yasai/
- 3) 亀和田光男ほか：“乾燥食品の基礎と応用”.
 幸書房 (1997)
- 4) 木村 進ほか：“食品と乾燥”. 光琳. (2008)
- 5) 小倉長雄：“食品加工学”. 建帛社. (1993)
- 6) 折笠貴寛ほか：“調理用トマトの乾燥特性”. 農業機械学会誌, 67(2), p46-52 (2005)
- 7) 折笠貴寛ほか：“青果物の熱風乾燥特性と硬化”. 農業機械学会誌, 67(6), p62-70 (2005)
- 8) 中村俊輝ほか：“調理用トマトの真空乾燥”. 農業機械学会誌, 67(6), p105-112 (2005)
- 9) 文部科学省 科学技術・学術審議会 資源調査分科会 食品成分委員会：“日本食品標準成分表”2020 年版（八訂）分析マニュアル 令和 4 年 2 月
- 10) 桐栄良三ほか：“化学工学概論”. 産業図書, (1979)
- 11) 村田 敏ほか：“馬鈴薯の乾燥特性の研究”（第 1 報）. 農業機械学会誌, 56(4), p45-52 (1994)
- 12) 村田 敏ほか：“千切大根の乾燥特性”. 農業機械学会誌, 55(4), p88-89 (1993)
- 13) 相良泰行：“食品乾燥の基礎知識（その 1）”. 冷凍, 79, (920), p17-23 (2004)
- 14) 佐藤真理ほか：“大粒干しブドウの重量比と水分活性”. 福島県農業総合センター平成 25 年度研究成果
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/37200a/h23-h27seika.html>
- 15) 佐藤真理：“大粒干しブドウ乾燥の目安と乾燥時間の短縮法”. 福島県農業総合センター平成 26 年度研究成果
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/37200a/h23-h27seika.html>
- 16) 齋藤 進：“食品色彩の科学”. 幸書房. p184-185 (1997)