

〈平成17年度〉

## 青果物ブランチングおよび乾燥へのマイクロ波の利用

田川 彰 男 ・ 小川 幸 春

(千葉大学大学院園芸学研究科)

### 目 的

青果物の加工中、あるいは加工後の品質劣化を避けるためには、加工前に青果物のもつ酵素を失活させる必要があり、ブランチングが行われている。しかし、そのほとんどは熱湯に数分間浸漬する方法であるため、栄養成分等の破壊や熱湯への溶出が起こるなどの問題があり、熱湯以外のブランチング方法の開発が望まれている。また、乾燥は青果物の加工方法の一つであり、その乾燥方法として熱風乾燥、真空（減圧）乾燥などが挙げられる。しかし、これらの方法は長時間を要する。そのため、これらとマイクロ波を併用することで、乾燥時間を大幅に短縮することが期待できる(Maskan, 2000)<sup>2)</sup>。青果物に対するマイクロ波乾燥の研究例はいくつかあるものの特定の青果物に対してであり、ほとんど普及していないのが現状である。

本研究はマイクロ波による様々な青果物の乾燥特性と適性照射条件、マイクロ波ブランチングにおける青果物個々の対象酵素に対する適性照射条件と照射方法の把握を目的として行った。

青果物個々により乾燥特性も異なり、また、ブランチングで対象とする酵素も異なるため、照射条件も異なってくる。そのため、ここでは紙面の関係上、主にダイコンのマイクロ波乾燥特性およびブランチングについてのみ報告することにする。

### I 供試材料

供試ダイコンは地元の量販店で入手し、実験に供試するまで10℃の冷蔵庫で保存した。なお、産地および品種は特に限定していない。ケイ藻土フィルム法（食品分析研究会, 1973)<sup>7)</sup>により求めたダイコンの初期含水率は $17.6 \pm 0.10$  (d.b. decimal)であった。

### II 乾 燥

#### 1. はじめに

試料にマイクロ波を照射すると、1) 水分を選択的に加熱する 2) 内部の水分を外部に押し出す 3) 表面を軟化させる 4) 試料を膨張させる、というような特徴を示す(柴田, 1986)<sup>8)</sup>。このような特徴により、マイクロ波照射は試料内部の水分を短時間で加熱、表面へ移動させ、その結果、表面からの水分蒸発が促進すると考えられ、その照射は減率乾燥期間または低含水率において効果的(Prabhanjan *et al.*, 1995)<sup>6)</sup>で、熱風、真空乾燥などと併用されている(Maskan, 1999)<sup>1)</sup>。また、熱風乾燥における硬化や収縮など試料の物理的変化が乾燥速度に影響を及ぼす(折笠ら, 2005)<sup>5)</sup>ことから、マイクロ波における試料の軟化および膨張も乾燥速度に影響を及ぼすと考えられる。本研究ではマイクロ波、熱風、真空乾燥における乾燥速度、および、物理的性質の変化の違いについて比較検討を行った。

## 2. 実験材料および方法

乾燥用試料は切り干し大根を意識して縦、横および厚さを $20 \times 1 \times 1$  (cm) とし、表面積は  $82 \text{ cm}^2$ 、質量は  $21.3 \text{ g}$ 、体積は  $20 \text{ cm}^3$  で、試料繊維方向が長軸方向となるように成形、作成した。

### 1) 乾燥方法

減率期間におけるマイクロ波乾燥と熱風、真空乾燥との乾燥速度の違いを調べるため、初期含水率から含水率約1.0 (d.b. decimal) までは、試料を $60^\circ\text{C}$ に設定した定温送風乾燥器で熱風乾燥した。その後、熱風、真空およびマイクロ波乾燥を行った。熱風乾燥は、同装置、同条件で引き続き行い、真空乾燥は $60^\circ\text{C}$ の恒温器内のデシケータ中に設置したロードセルに試料を吊り下げた後、真空ポンプを稼働させ乾燥を行った。マイクロ波乾燥には電子レンジを用いた。照射条件は、予備実験の結果から出力100W、照射時間20 sおよび休止時間220 s、すなわち、照射と休止時間合わせて4 minを1サイクルとし、このサイクルを乾燥終了まで繰り返し行った。各乾燥において、目標含水率を0.3 (d.b. decimal) に設定した。

### 2) 測定項目

各乾燥過程において、乾燥特性を把握するために必要な試料の質量変化および表面積変化、乾燥速度に影響を及ぼす物理的要因である試料温度変化、硬度変化、および空隙率変化をそれぞれ測定した。

### 3) 測定方法

#### a 温度変化

熱風および真空乾燥では素線径 0.3 mmのT型熱電対、マイクロ波乾燥では光ファイバー温度計を用いて試料中心温度を測定した。いずれも、15s間隔でデータロガに取り込んだ。

#### b 質量変化 (含水率変化)

熱風乾燥では 30 min間隔、マイクロ波乾燥では 4 min間隔で質量を測定した。真空乾燥では

ロードセルからの信号は静歪計を介し、15 s間隔でデータロガに取り込み測定した。なお、減少質量はすべて蒸発水分とみなした。

また、表面積、硬度、空隙率変化について、熱風および真空乾燥では 30 min、マイクロ波乾燥では 4 min間隔で測定した。

#### c 表面積変化

目視により、乾燥開始から目標含水率に到達するまで、試料はほぼ直方体の形状を維持し続けたため、設定時間ごとにデジタルノギスで試料の縦、横および厚さを測定し、その値から表面積を算出した。

#### d 硬度変化

クリープメータにより試料平面上の任意の3点の硬度を測定した。試料の80%圧縮されたときの応力が測定され、その平均値にプランジャー断面積を乗じて荷重を算出し、その値を硬度とした。

#### e 空隙率変化

試料の空隙率は以下の式で定義される。

$$\varepsilon_a = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_t} \quad (1)$$

ここに、 $\rho_{ap}$ : 見かけ密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $\rho_t$ : 真密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]。

$\rho_{ap}$ は水置換法により求めた体積より算出、 $\rho_t$ はピクノメータ法により求めた乾物密度の測定結果より算出(相馬ら, 2004)<sup>9)</sup>した。

## 3. 結果および考察

### a 温度変化

熱風、および真空乾燥における試料温度は約15分で乾燥空気温度にほぼ一致した。マイクロ波乾燥における試料中心温度は照射後 20 sで約 $65^\circ\text{C}$ に達し、その後の220秒で約 $35^\circ\text{C}$ まで低下した(図1)。この240 sを1サイクルとして照射と休止を繰り返し行った。

### b 含水率変化

図2に熱風、真空およびマイクロ波乾燥にお

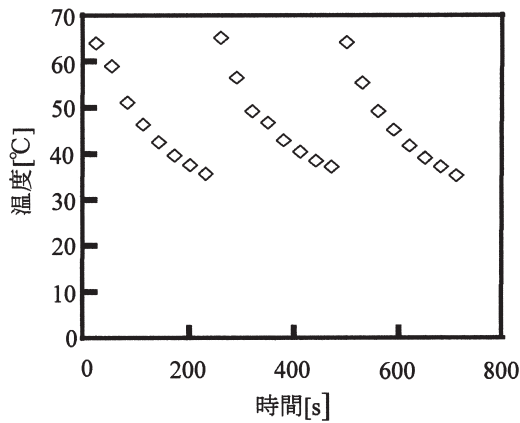


図1 マイクロ波乾燥の試料中心温度の変化

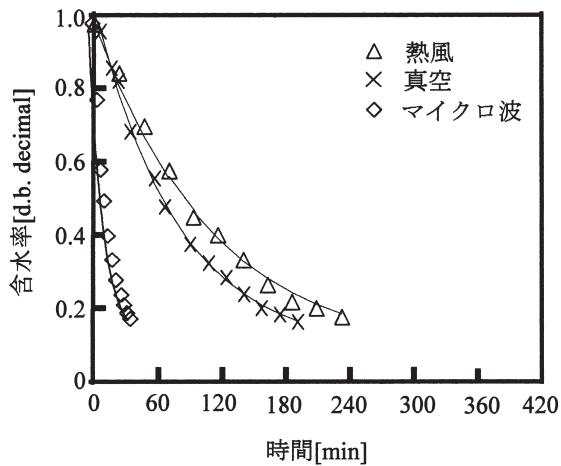


図2 含水率経時変化

るダイコンの含水率経時変化を示す。目標含水率に到達するまでの時間は、熱風乾燥、真空乾燥、マイクロ波乾燥の順に短くなる結果が得られた。なお、実線は後述の式による計算値である。

そこで、乾燥過程に影響を及ぼすと考えられる乾燥中の試料の硬度や表面積変化および空隙率など試料の形状、構造変化を調べた。

c 硬度変化

熱風、真空およびマイクロ波における乾燥前後のダイコンの硬度変化を表1に示す。各乾燥法において、乾燥後の硬度は乾燥前と較べ明らかに減少しており、特にマイクロ波乾燥においてその減少は最も著しい。加熱によるダイコンの軟化はペクチンのβ-脱離反応に支配されると報告(岡崎ら, 1997)<sup>4)</sup>されており、本研究においても同じ

表1 乾燥前後における硬度変化

乾燥前硬度 [N]	乾燥後硬度 [N]		
	マイクロ波	熱風 (60°C)	真空 (60°C)
66 ± 4.3	2.3 ± 1.1	41 ± 3.1	42 ± 0.7

数値は平均値 ± 標準誤差 (n=3) を表す

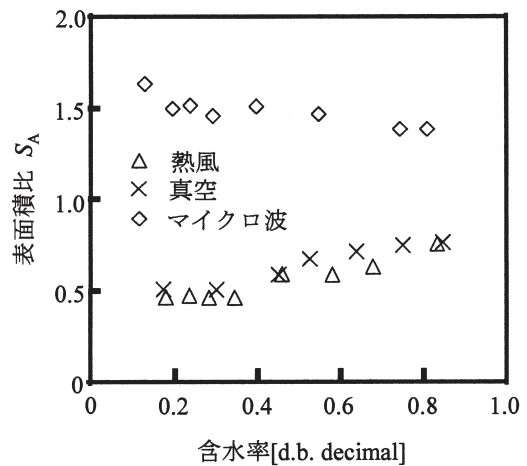


図3 表面積比と含水率

理由で硬度が減少したと推察される。

d 表面積変化

熱風、真空およびマイクロ波における乾燥前後のダイコンの表面積変化を図3に示す。乾燥の進行に伴い、熱風および真空乾燥では含水率0.4程度までは直線的に表面積の減少すなわち収縮が起こっており、その後一定となる。一方、マイクロ波乾燥では緩やかな左上がりの直線で表面積の増加すなわち膨張が起こり、これは柴田(1986)<sup>8)</sup>の説明を裏付けている。

e 空隙率変化

図4に熱風、真空およびマイクロ波乾燥におけるダイコンの空隙率変化を示す。空隙率は熱風および真空乾燥では20%前後でほぼ一定であったが、マイクロ波乾燥では乾燥の進行に伴い急激に増加した。前項のマイクロ波乾燥時の表面積増加は、空隙率が増加することで試料の組織強度が低下し、マイクロ波による膨張作用の影響を受けたと考えられる。

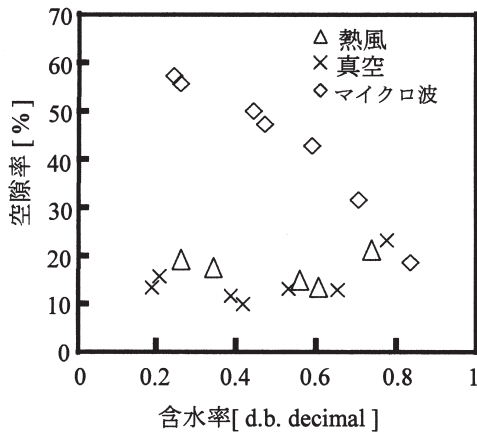


図4 空隙率変化

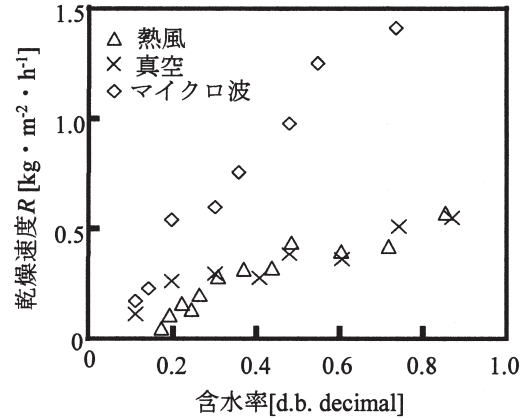


図5 乾燥速度曲線

### 乾燥速度曲線

収縮を考慮して以下の式より乾燥速度 $R$ を算出した。

$$R = \frac{W_d}{A} \cdot \frac{dM}{dt} \quad (2)$$

ここで、 $R$ は乾燥速度 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ],  $W_d$ は試料乾物質質量 [ $\text{kg}$ ],  $A$ は水分蒸発面積 [ $\text{m}^2$ ],  $M$ は含水率 [d.b. decimal],  $t$ は時間 [ $\text{h}$ ]。表面積の測定結果を利用して乾燥速度 $R$ を計算し、含水率に対してプロットした(図5)。乾燥速度はどの乾燥法においても含水率の低下とともに直線的に減少しており、1.0 (d.b. decimal) 以降の乾燥は減率乾燥第一段にあって、以下の式(3)で与えられる。

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (3)$$

ここで、 $k$ は乾燥速度定数 [ $\text{h}^{-1}$ ],  $M_e$ は平衡含水率 [d.b. decimal]。

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (4)$$

測定データをこの式に非線形最小二乗法を適用して当てはめ、乾燥速度定数 $k$ を算出した。表2に各乾燥方法における $k$ の値を示す。マイクロ波乾燥の $k$ は他より10倍以上も大きく、熱風および真空乾燥では乾燥温度が高いほど $k$ は大きくなる。

表2 決定された乾燥速度定数  $k$ 

	乾燥速度定数 $k$ [ $\text{h}^{-1}$ ]	設定温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]			
		40	50	60	70
マイクロ波	4.391	—	—	—	—
熱風	—	0.092	0.156	0.254	0.282
真空	—	0.106	0.202	0.266	0.304

図には示さなかったが、熱風および真空乾燥における $k$ には、Arrhenius型の温度依存性が確認できた。また、図2より、式(4)による計算値と測定値はよく一致しているのが伺え、1.0 (d.b. decimal) 以降におけるダイコンの乾燥はいずれの乾燥方法においても減率乾燥第一段にあることが示された。

### III ブランチング

#### 1. はじめに

一部の果物と野菜の多くは加工の際熱湯で短時間加熱される。この目的は酵素を不活性化させ、加工中あるいは加工後の褐変、異臭、変味を防ぎ、組織内のガス(主に酸素)を膨張排除して成分の損失を防ぐこと、また、付着微生物の除去や殺菌の効果もある。本研究は短時間で過熱およびガスの膨張排除が可能なマイクロ波照射によって、熱湯によるブランチングの代替の可能性の有無を調べる目的で行った。本研究では対象酵素としてパーオキシダーゼを選び、その失活状況を測定す

ることで、ブランチング効果を調べることにした。

## 2. ブランチング条件と方法

ブランチング用として、試料のダイコンの上下10cmをカットし、残りの部分を厚さ1cmのスライス状にして実験に供試した。

### 1) ブランチング条件

#### [熱湯ブランチング]

試料を $99.2 \pm 0.02^\circ\text{C}$ の熱湯に一定時間完全に浸した。ブランチング時間は5, 10, 20および30 minの4段階とした。

#### [マイクロ波ブランチング]

電子レンジ(ER-D10, (株)東芝)を用いた。出力1000W, 処理時間は10, 20, 30, 40, 50, 60および90 sの7段階とした。

ブランチング後、直ちに $10^\circ\text{C}$ の冷水により5 min試料を冷却した。その結果、冷却により試料中心温度は $20 \sim 30^\circ\text{C}$ まで低下した。

### 2) 測定項目

パーオキシターゼ活性および質量を測定した。

### 3) 測定方法

パーオキシターゼ活性はMuddら(1959)<sup>3)</sup>の方法を一部改変して測定した。また、一部の試料については、ブランチング処理中の試料中心温度を光ファイバー温度計で測定した。

## 3. 結果および考察

### 1) マイクロ波出力の決定

予備実験として出力200および500W, 処理時間30 sでブランチングを行い、試料中心温度を測定した。その結果、処理後の試料中心温度は出力200および500Wでそれぞれ25および $58.7^\circ\text{C}$ となった。また、出力500W, 処理時間30 sにおける酵素活性は $5.21 \text{ Unit}/100\text{gFW}$ と活性を示したことから、マイクロ波出力をさらに高く設定して試料温度を上げなければ、パーオキシターゼは失活しないことが示された。本来ならばマイクロ波出力と照射時間について詳細な実験を行い、それらを決

定する必要があるが、明確な酵素活性のデータの違いを把握するため、時間の関係で使用した装置の最大出力の1000Wで照射を行うことにした。

### 2) 酵素活性と温度

図6にマイクロ波および熱湯による酵素活性および温度の変化を示す。図より、マイクロ波ブランチングは試料温度が $80^\circ\text{C}$ を超える30 sから酵素失活効果が認められたが60 s処理しても約52%のパーオキシターゼ活性が残った。さらに90s処理後でも約25%の活性が残った。熱湯ブランチングは約2 minで試料中心温度が $80^\circ\text{C}$ に達し、5 min後には約 $98^\circ\text{C}$ となった。その際、約23%のパーオキシターゼ活性が残った。10, 20および30 minのブランチング処理においてパーオキシターゼ活性は認められなかった。

### 3) 質量損失

冷却終了後、吸水紙で試料表面の余剰水分を除去した後、試料質量を測定した。質量の減少量を初期質量で除すことにより質量損失率を算出した。図7にマイクロ波および熱湯ブランチング中の質量損失率の変化を示す。その結果、マイクロ波、熱湯ともに処理時間の進行に伴い質量損失率は増加した。熱湯処理10 minで約6%, 図には示していないが30 minで約12%の質量減少があり、水分以外の試料内成分が溶出しているのが伺える。これに対し、マイクロ波処理での質量損失

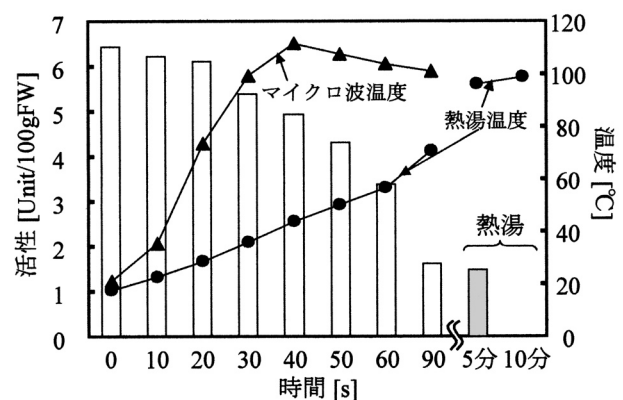


図6 マイクロ波ブランチングにおける酵素活性および温度変化

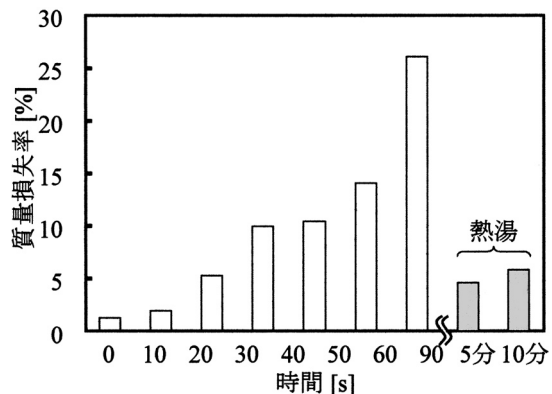


図7 質量損失率とマイクロ波ブランチング時間の関係

率は熱湯より大きく、処理60 sで14%、90 sでは26%の質量減少があり、処理に対し乾燥を伴うことが認められた。

以上の結果から、マイクロ波照射条件をさらに検討する必要があるが、マイクロ波処理により乾燥とブランチングを同時に行うことができる可能性が示唆された。

#### 文献

- 1) Maskan, M., Microwave/air and microwave finish drying of banana, *Journal of Food Engineering*, 44(2), 71-78, 1999
- 2) Maskan, M., Kinetics of color change of kiwifruits during hot air and microwave drying, *Journal of Food Engineering*, 48(2), 169-175, 2000
- 3) Mudd, J., Johnson, B., Burris, R., Oxidation of Indoleacetic Acid by Quackgrass Rhizomes, *Plant Physiology*, 34, 144-148, 1959
- 4) 岡崎 尚, 鈴木寛一, 前重静彦, 加熱によるダイコンの軟化およびペクチンの分解に関する速度論的解析, *日本食品科学工学会誌*, 44(9), 647-652, 1997
- 5) 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*, 67(6), 62-70, 2005
- 6) Prabhanjan, D.G., Ramaswamy, H.S., Raghavan, G.S.V., Microwave -assisted convective air drying of thin layer carrots, *Journal of Food Engineering*, 25(2), 283-293, 1995
- 7) 食品分析研究会, 食品分析研究会報告書, 37-40, 1973
- 8) 柴田長吉朗, 工業用マイクロ波応用技術, 電気書院, pp56-57, 1986
- 9) 相馬真哉, 田川彰男, 飯本光雄, 乾燥過程における青果物の構造的特性の変化が熱伝導率に及ぼす影響, *日本食品科学工学会誌*, 51(8), 428-434, 2004

## Application of the Microwave to Blanching and Drying of Vegetables

Akio Tagawa and Yukiharu Ogawa

(Graduate school of Horticulture, Chiba University)

The applicability of the microwave to the blanching and drying of vegetables was examined. In drying treatment, the changes of drying rate, hardness, surface area, and porosity in hot air, vacuum, and microwave drying were measured and compared. Therefore, microwave drying had the largest drying rate and remarkably decreased the hardness of sample. In addition, the increase of surface area and the porosity of samples were caused by microwave drying. Moreover, changes of temperature, enzymatic activity, and mass during the blanching treatment in boiled water and microwave were examined. These results suggested the simultaneous applicability of the microwave to the blanching and drying of vegetables.