

積算温度を指標としたコマツナの 遠赤外線乾燥における品質変化の評価

岡本慎太郎*¹・折笠貴寛*^{2§}・畑中咲子*³・菰田俊一*³
齊藤順一郎*⁴・富樫千之*¹・村松良樹*⁵
小出章二*²・椎名武夫*⁶・田川彰男*⁷

* 1 宮城大学大学院食産業学研究科

* 2 岩手大学農学部

* 3 宮城大学食産業学部

* 4 東洋興産(株)

* 5 東京農業大学生物産業学部

* 6 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所

* 7 千葉大学大学院園芸学研究科

Evaluation of Quality Change in the Far-infrared Drying of Komatsuna Leaves Using Cumulative Temperature as an Indicator

OKAMOTO Shintaro*¹, ORIKASA Takahiro*^{2§}, HATANAKA Sakiko*³, KOMODA Toshikazu*³,
SAITO Junichiro*⁴, TOGASHI Chiyuki*¹, MURAMATSU Yoshiki*⁵,
KOIDE Shoji*², SHIINA Takeo*⁶ and TAGAWA Akio*⁷

* 1 *Graduate School of Food, Agriculture and Environmental Science, Miyagi University,
2-2-1 Hatatate, Taihaku, Sendai, Miyagi 982-0215*

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

* 3 *School of Food, Agriculture and Environmental Science, Miyagi University,
2-2-1 Hatatate, Taihaku, Sendai, Miyagi 982-0215*

* 4 *Toyo Kosan, Co., Ltd., 6-7-10 Nishikigaoka, Aoba, Sendai, Miyagi 989-3123*

* 5 *Faculty of Bio-industry, Tokyo University of Agriculture, 196 Yasaka, Abashiri, Hokkaido 099-2493*

* 6 *National Food Research Institute, NARO, 2-1-12 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642*

* 7 *Graduate School of Horticulture, Chiba University, 648 Matsudo, Matsudo, Chiba 271-8510*

In this study, we determined the quality changes (surface color, and L-ascorbic acid, carotenoid, and chlorophyll contents) and drying rate during far-infrared drying and hot-air drying of Komatsuna leaves. Three different drying temperatures ranging from 44°C to 55°C were employed in both methods. Cumulative temperature was used as an indicator of quality change. The measured moisture content changes under each set of drying conditions agreed with those calculated using an exponential model. An Arrhenius-type equation was used to establish the relationship between the drying rate constant k and the average surface temperature during drying. Under the ideal drying conditions, the cumulative temperature at the sample surface served as a useful index of the decrease in the L-ascorbic acid content. In addition, the surface color of the Komatsuna leaves changed to a lesser extent as the cumulative surface temperature decreased. Etiolation of the sample during drying was

* 1 〒982-0215 宮城県仙台市太白区旗立 2-2-1

* 2 〒020-8550 岩手県盛岡市上田 3-18-8

§ Corresponding author, E-mail: orikasa@iwate-u.ac.jp

* 3 〒982-0215 宮城県仙台市太白区旗立 2-2-1

* 4 〒989-3123 宮城県仙台市青葉区錦ヶ丘 6-7-10

* 5 〒099-2493 北海道網走市八坂196

* 6 〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12

* 7 〒271-8510 千葉県松戸市松戸648

caused by the decrease in the chlorophyll rather than the decrease in the carotenoid content.

(Received Mar. 6, 2013; Accepted Aug. 5, 2013)

Key words: Komatsuna, far-infrared drying, cumulative temperature, drying rate, quality evaluation

コマツナ, 遠赤外線乾燥, 積算温度, 乾燥速度, 品質評価

青果物は、収穫された後、一般的に出荷団体や小売店等の流通市場を経て、消費者の手に渡る。しかし、その流通過程で規格外品や未成熟品、余剰品が発生し、青果物の国内総生産量の約18%が廃棄処分されている¹⁾。これは有用資源を無駄にしているばかりでなく、環境にも悪影響を及ぼすため無視できない。これに対処するには、廃棄処分されている青果物を適正に処理・加工し、有効利用することが考えられる。そして、青果物廃棄量の削減、すなわち環境負荷の低減効果も期待される。一方、2011年3月11日に発生した東日本大震災により、多くの住民が避難所生活を余儀なくされた。その避難所生活の長期化に伴い避難住民の栄養不足が深刻化したという報告²⁾がある。そのような状況において、規格外品や廃棄処分品が乾燥食品や栄養補助剤などの原料として商品化・備蓄化できれば、これら諸問題解決策の一助になることが期待される。主要な葉菜類の一つであるコマツナは、アスコルビン酸やビタミンA等の栄養成分を豊富に含んでいる³⁾。また、施設栽培技術が普及したため、年間を通して容易に入手できる。しかし、平成22年度の統計表⁴⁾によると、出荷量は生産量と比べて約15%少なく、出荷されないコマツナの多くは収穫後に廃棄処分となっていると推察される。さらに、コマツナをはじめとする葉菜類は貯蔵できないものとして扱われているため⁵⁾、出荷された後も相当量の葉菜類が廃棄処分されていると考えられる。したがって、廃棄量を削減し、有効資源の利用率を高めるために、コマツナにおいても適切な加工技術の確立が必要である。加工操作のひとつである乾燥は、貯蔵安定性や輸送性の向上⁶⁾、栄養成分の濃縮等の高付加価値化および調理工程の簡便化⁷⁾等を図るために実施される。乾燥の対象となる青果物は多岐にわたり、原料の特性や乾燥の目的に応じて、様々な乾燥方法が用いられているが、熱風乾燥は、操作が簡便であり、かつ汎用性も高いことから、青果物の乾燥処理には広く用いられている。一方、遠赤外線は、周囲の空気に吸収されず被加熱物表面に到達し加熱効果を表す⁸⁾ことが特徴であり、HEBBARら⁹⁾は遠赤外線乾燥および遠赤外線を併用した通風乾燥は熱風乾燥と比べて乾燥のエネルギー効率は良好であると報告している。遠赤外線乾燥は米麦など穀物の乾燥¹⁰⁾への適用事例が報告されており、その技術は実用段階にあるが、遠赤外線乾燥の青果物への適用例は数例^{11)~13)}に留まっている。最適な乾燥方法・条件の選定や高品質な乾燥食品を得るためには、乾燥に伴う品質変化に関する知見は不可欠である。岡本ら¹⁴⁾は、コマツナの遠赤外線乾燥実験を行い、コマツナの乾燥過程に

おける成分変化や電力効率について詳細に調べている。しかしながら、乾燥空気温度などの乾燥条件の範囲は限定的であり、遠赤外線乾燥過程における品質変化の温度依存性の把握までは至っていない。さらに、遠赤外線乾燥と熱風乾燥で乾燥速度が同じ場合、遠赤外線乾燥における葉面温度が約3℃低いために、遠赤外線乾燥後のコマツナのL-アスコルビン酸残存率は熱風乾燥後のそれと比べて有意に大なることを報告している¹⁴⁾が、アスコルビン酸残存率をはじめとする乾燥過程における品質変化を検討する際には、葉面温度のみではなく乾燥時間にも着目する必要があると考えられる。そこで、本研究では、遠赤外線乾燥がコマツナの乾燥特性および品質に及ぼす影響を3段階の乾燥温度で検討し、遠赤外線乾燥過程における乾燥速度および各種成分変化の温度依存性について考察した。特に、L-アスコルビン酸残存率については積算温度に着目して考察し、積算温度が最適乾燥方法を選定する際に新しいかつ有用な評価法になり得る可能性が示されたので併せて報告する。

実験方法

1. 供試材料

供試材料は、コマツナ (*Brassica rapa* var. *perviridis*) で、地元の量販店において入手した。入手時期は2012年5月から2012年11月とした。なお、産地は宮城県産のものとし、品種は限定しなかった。試料は、保存中の成分変化を限りなく少なくするために武田ら¹⁵⁾の報告を参考にし、入手後直ちにポリエチレン袋に非密封の状態に入れ、約5℃の冷蔵庫内で床面に対して垂直になるように保存し、7日以内に実験に供した。供試する際には、株元から10mmのところを切断し、葉身および葉柄部を使用した(以下、試料)。105℃-24h炉乾法にて試料の初期含水率を測定したところ、16.40±1.2 (n=18) (d.b. decimal) (0.94±0.002 (w.b. decimal))であった。以後、含水率はすべて乾量基準含水率 (d.b. decimal) で表すこととした。

2. 乾燥方法

遠赤外線乾燥と熱風乾燥2通りの方法で試料を乾燥させた。試料の初期投入量は約45gとした。なお、目標含水率を0.2 (d.b. decimal) と設定し、目標含水率以下になるまで乾燥させた。

(1) 遠赤外線乾燥 遠赤外線乾燥機 (A10-S, 東洋興産 (株)) を用いて遠赤外線乾燥特性を測定した。この乾燥機の乾燥室は縦1,140×横560×奥行830mmであり、450×1,100mmの遠赤外線放射パネル (電気式遠赤外

線面状ヒータ, 東洋興産(株))が手前・奥に, 700×1,100 mmの遠赤外線放射パネルが左・右にそれぞれ装着しており, それらが熱源となる。なお, 本研究で用いた遠赤外線放射パネルの遠赤外線放射特性(放射率および分光放射輝度)をFig.1に示す。機内の圧力は, ひずみゲージ式圧力センサ(PG-2, (株)共和電業)を用いて測定し, アンプ(WGA-710-5, (株)共和電業)でひずみを電圧に変換させ, データログ(GL220, グラフテック(株))に記録した。なお, 機内圧力は94.7~96.6kPa(大気圧は98.0~99.9kPa), 機内の風速は0.2~0.5m/sであった。試料の初期投入量は約45gで, 遠赤外線乾燥機における専用のトレー(W460×L700mm)に試料をそれぞれ均等間隔にかつ, それぞれの試料が重ならないよう, 乾燥室内の中間の高さに静置した。葉面温度の測定には, 蛍光式光ファイバー温度計(FL-2000, 安立計器(株))および光ファイバーセンサ(FS100-3M, 安立計器(株))を用いた。センサの測定部を葉面に厚さ0.058mm, アセテートフィルム製のメンディングテープ(CM-12, スコッチ)で固定し, 葉面温度を1秒間隔で測定した。乾燥機の設定温度は35, 40および45℃の3段階と設定した。なお, 遠赤外線放射パネルの温度は設定した入力電圧によって変動する。本研究で設定した入力電圧(100V)では, 3つの設定温度すべてにおいて, 遠赤外線放

射パネルの温度は設定温度と比べて約15℃高い値で推移した。Fig.2に遠赤外線乾燥における葉面温度の推移を示す。Fig.2から葉面温度の乾燥開始から乾燥終了までの平均温度(以下, 葉面温度)は, 35, 40および45℃でそれぞれ49.3, 53.6および54.5℃であった。

(2) 熱風乾燥 熱風乾燥には定温送風乾燥機(DK600, ヤマト科学(株))を用いた。本研究では, 同じ乾燥速度において2種類の方法(遠赤外線乾燥と熱風乾燥)により乾燥させた試料の品質や理化学的特性などを比較することを目的としたため, 予備実験より, 遠赤外線乾燥と同程度の乾燥速度となるように設定温度を調整した。Fig.3に熱風乾燥における葉面温度の推移を示す。設定温度を47, 51および56℃としたところ, その際の葉面温度は44.4, 50.2および54.3℃となった。なお, 葉面の温度測定には, 素線径0.6mmのT型熱電対を用いて測定し, データログ(GL220, グラフテック(株))に1秒間隔で記録した。風速は0.2~0.5m/sとした。

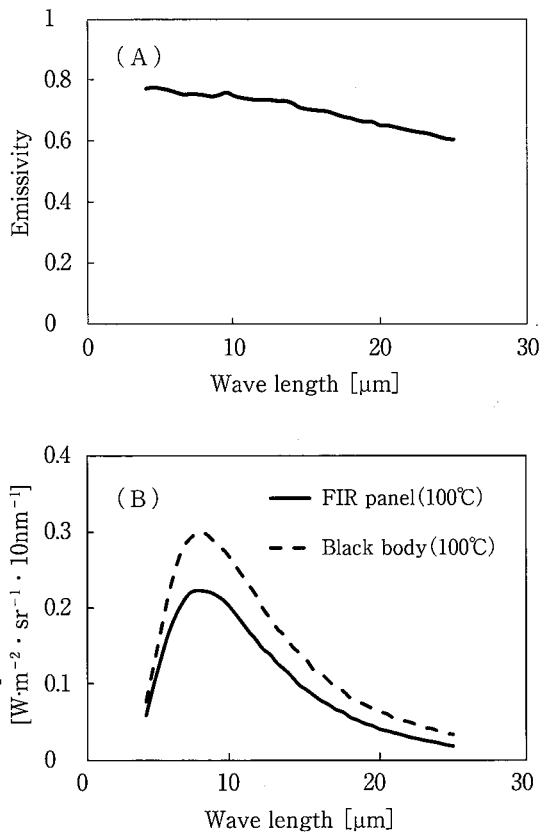


Fig.1 Far-infrared radiation characteristic of the panel (A) is the emissivity of the panel; (B) is the spectral radiance of the panel

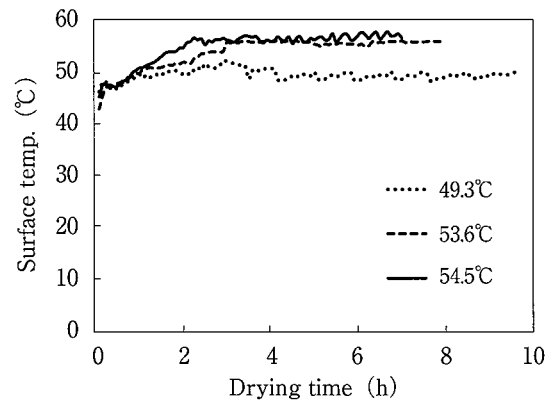


Fig.2 Changes in surface temperature during far-infrared drying at three temperature ranges Temperatures of explanatory note mean average temperature of the sample surface during far-infrared drying.

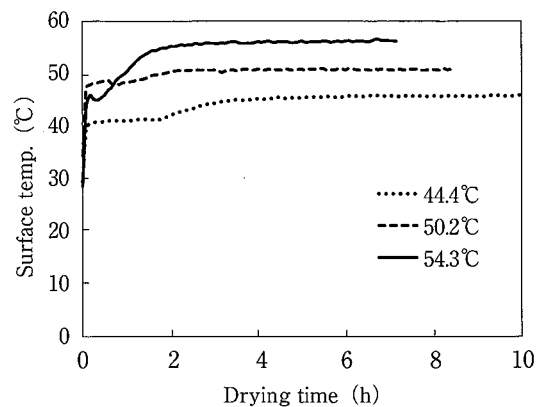


Fig.3 Changes in surface temperature during hot air drying at three temperature ranges Temperatures of explanatory note mean average temperature of the sample surface during far-infrared drying.

3. 測定項目

(1) 乾燥過程における質量(含水率)変化 各乾燥過程における試料質量変化は、60分間隔で電子天秤(GF-300, (株) エー・アンド・デイ)を用いて測定した。減少した質量は全て蒸発水分量とみなし、乾量基準含水率(d.b. decimal)に換算した。

(2) 積算温度 光ファイバー温度計およびT型熱電対を用いて測定した葉面の温度変化を乾燥開始から乾燥終了まで積算した値を積算温度 T_{cum} ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$)と定義した。すなわち、 T_{cum} は時間 t における温度 $T(t)$ を乾燥開始から乾燥終了まで積分した値に等しくなるので、以下の式(1)で表すことができる。

$$T_{cum} = \int_{t_1}^{t_2} T(t) dt \quad (1)$$

ここで、 t_1 は乾燥開始時間(h)、 t_2 は乾燥終了時間(h)である。

上式より算出した遠赤外線乾燥および熱風乾燥における積算温度は、Table 1に示した。

(3) 乾燥前後におけるL-アスコルビン酸含有量変化 L-アスコルビン酸は非常に酸化されやすく¹⁶⁾、かつ熱を加えると分解速度が大きくなる性質¹⁶⁾があり、乾燥青果物の品質劣化の指標として度々用いられている¹⁷⁾ため、本研究においてもL-アスコルビン酸含有量(mg/100g-FW)を、藤原ら¹⁸⁾の測定法を改変した方法で測定した。すなわち、設定した含水率まで乾燥した試料を5%(w/w)メタリン酸溶液とともにホモジナイザ(RH91, (株)エスエムテ)にて摩砕(約8,000rpm, 10min, 0-4 $^{\circ}\text{C}$)し、ろ過した溶液のL-アスコルビン酸含有量(mg/100ml)を反射式光度計(RQ-flex10, メルク(株))を用いて測定した。得られた値に希釈倍率を乗じて試料100gあたりのL-アスコルビン酸含有量(mg/100g-FW)に換算した。乾燥処理後の乾物1gあたりのL-アスコルビン酸含有量(mg/g-DW)を乾燥処理前のそれで除すことにより、L-アスコルビン酸残存率を算出した。

(4) 乾燥前後における色彩変化 試料の色彩は色彩色差計(CR-13, コニカミノルタセンシング(株))を

用いて、 $L^*a^*b^*$ 表色系により測定した。1試料につき葉面の4点を測定し、その平均値を実験値とした。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(2)、(3)および(4)により色差 ΔE 、彩度 C^* および色相角 h° をそれぞれ算出¹⁹⁾した。

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

$$C^* = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3)$$

$$h^{\circ} = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (4)$$

また、青果物の黄化の指標として用いられている黄化度 YI ²⁰⁾を以下の式(5)により算出した。

$$YI = \frac{L^* \times a^*}{|b^*|} \quad (5)$$

(5) 乾燥前後におけるカロテノイド等含有量変化

カロテノイド(ルテイン、 β -カロテン)およびクロロフィルa、b含有量は、色彩および品質変化の指標として測定した。満田らの簡易抽出法²¹⁾を改変して試料溶液を調製し、HPLCにて分析した。カラムには4.6 \times 150mmのMGIIカラム((株)資生堂)を、検出器にはUV検出器(L-2400, 日立製作所(株))をそれぞれ用いた。移動相にはアセトニトリル:水(9:1)(以下A)および酢酸エチル(以下B)を用いた。移動相はまずAのみとし、その後、直線的にBの濃度を上げて20分後にはA:B=50:50になるような条件とした。流速は1.2ml/min、測定波長は450nmとした。分析用溶液は乾燥前試料の場合には約3gに、乾燥後試料の場合については約0.3gにアセトンを30ml程度加え、ホモジナイザ(RH91, (株)エスエムテ)にて摩砕抽出(約8,000rpm, 10min, 0-4 $^{\circ}\text{C}$)し、これを3回繰り返した後、微量高速冷却遠心機(MX-301, (株)トミー精工)にて遠心分離(8,000rpm, 10min, 4 $^{\circ}\text{C}$)後、その上清を100mlに定容し、HPLC分析用供試液とした。ルテインは0.005~0.10mg/ml、 β -カロテンは0.012~0.24mg/100mlおよびクロロフィルa、bは0.005~0.10mg/mlの標準溶液を用いた絶対検量線法により、溶液中のルテイン、 β -カロテンおよびクロロフィルa、b濃度(mg/100ml)を測定し、含有量(mg/100g-FW)に換算した。

乾燥処理後の乾物1gあたりのルテイン、 β -カロテンおよびクロロフィルa、b含有量(mg/g-DW)を乾燥処理前のそれで除すことにより、ルテイン、 β -カロテンおよびクロロフィルa、b残存率に換算した。

実験結果および考察

1. 乾燥過程における含水率変化

Fig. 4に遠赤外線乾燥における含水率変化の一例を示す。Fig. 4より、いずれの乾燥温度においても含水率は時間の経過とともになめらかな曲線を描きながら減少していることがわかる。Fig. 5に遠赤外線乾燥における乾燥特性曲線を示す。Fig. 5より、乾燥開始から乾燥速度

Table 1 The relationship between surface temperature during each drying of Komatsuna leaves and cumulative temperature calculated from equation (1)

	Surface Temp. ($^{\circ}\text{C}$)		Cumulative Temp. ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$)
Far-Infrared	49.3	→	4.76×10^2
	53.6	→	4.25×10^2
	54.5	→	3.82×10^2
Hot Air	44.4	→	4.68×10^2
	50.2	→	4.24×10^2
	54.3	→	3.93×10^2

Surface temperature means average temperature of the sample surface during drying.

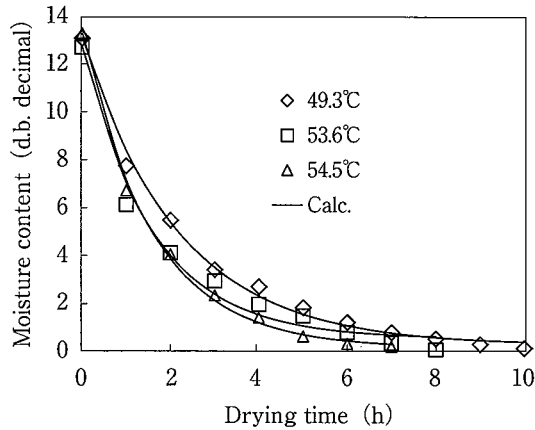


Fig. 4 Changes in moisture content of Komatsuna leaves during far-infrared drying

Temperatures of explanatory note mean average temperature of the sample surface during far-infrared drying. Solid lines show the calculated value from exponential model.

は直線的に低下し、含水率と乾燥速度の間に直線の関係が得られた。これより試料の遠赤外線乾燥および熱風乾燥過程は、減率乾燥第一段であることがうかがえる。減率乾燥第一段の含水率変化は以下の式(6)で与えられる²²⁾。

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (6)$$

ここで、 M は t 時間における含水率 (d.b. decimal), M_e は平衡含水率 (d.b. decimal), M_0 は初期含水率 (d.b. decimal) k は乾燥速度定数 (h^{-1}) である。

遠赤外線乾燥および熱風乾燥の含水率変化の測定データを式(6)に当てはめ、非線形最小二乗法により定数 k を算出した。Fig. 3に式(6)による含水率の計算値と測定値の比較を示す。計算値と測定値の平均平方誤差(RMSE)²³⁾は0.20~0.49 (d.b. decimal), 決定係数(R^2)は0.94~0.99であったことから、実験値に対する式(6)の適合性は高く、乾燥期間は減率乾燥第一段であることが示された。また、非線形最小二乗法により決定した k の値をTable 2に示す。いずれの乾燥法においても、葉面温度が高くなるにつれて乾燥速度定数が大きくなっていることがわかる。乾燥速度定数 k の温度依存性を調べるために、 k を以下の式(7)²⁴⁾に乾燥法ごとに最小二乗法を適用して当てはめた。

$$k = d \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (7)$$

ここで、 d は係数 (h^{-1}), E はみかけの活性化エネルギー (J/mol), R はガス定数 ($=8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$), T は葉面絶対温度 (K) をそれぞれ表す。

Fig. 6に遠赤外線乾燥および熱風乾燥の乾燥速度定数 k のArrheniusプロットを示す。Fig. 6より、式(7)の適合性が良好であることが示され、遠赤外線および熱風乾燥の乾燥速度定数 k はArrhenius型の温度依存性を有し

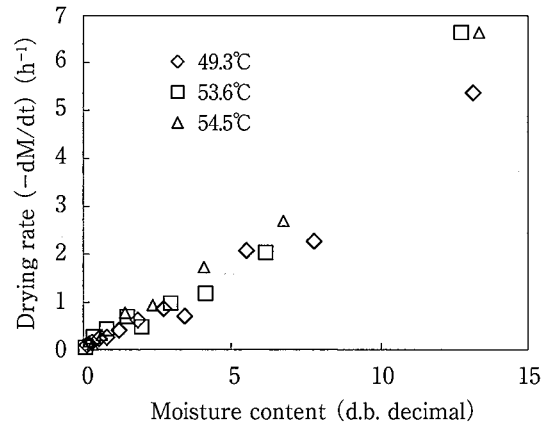


Fig. 5 Relationship between the drying rate and the moisture content of Komatsuna leaves

Temperatures of explanatory note mean average temperature of the sample surface during far-infrared drying.

Table 2 Drying rate constants k and root mean squared error (RMSE) of the exponential model by far-infrared drying and hot air drying

Surface Temp.	Far-Infrared k (h^{-1})	Surface Temp.	Hot Air k (h^{-1})
49.3	0.458	44.4	0.403
53.6	0.629	50.2	0.692
54.5	0.631	54.3	0.808

Surface temperature means average temperature during drying.

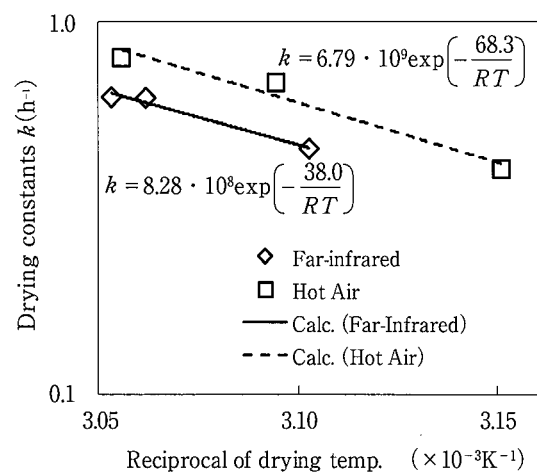


Fig. 6 Arrhenius plot of the drying contents k vs. the reciprocal of drying temperature $1/K$ for Komatsuna leaves

ていることが確認できた。一方、みかけの活性化エネルギー E の値は、遠赤外線乾燥で38.0kJ/mol, 熱風乾燥で68.3kJ/molであり、熱風乾燥における乾燥速度定数の温度依存性は遠赤外線乾燥のそれよりも強いことが示された。

2. 乾燥過程におけるL-アスコルビン酸含有量変化と葉面積算温度の関係

岡本ら¹⁰⁾は、コマツナ乾燥過程におけるL-アスコルビン酸残存率変化について、試料温度をパラメータとして反応速度論を用いて解析している。しかし、乾燥温度が異なると乾燥時間も変動するため、乾燥温度と乾燥時間双方の影響を同時に考慮する必要がある。そこで本研究では、乾燥温度と乾燥時間の双方を同時に評価できる積算温度に着目して、L-アスコルビン酸の残存率について考察することとした。Fig.7に葉面温度の積算値を横軸に、L-アスコルビン酸残存率を縦軸にとった結果を示す。Fig.7より、有意差はみられなかったものの、遠赤外線乾燥のL-アスコルビン酸残存率が、熱風乾燥のそれと比べて高い傾向となっている。また、積算温度が大きいほど、L-アスコルビン酸残存率が大きい傾向がみられる。Table 1より、本研究で設定したコマツナの乾燥においては、葉面温度が低く、かつ乾燥時間が長いほど積算温度が大きくなる。そのため、低温かつ長時間の乾燥条件(積算温度が大きい条件)において、コマツナ乾燥過程

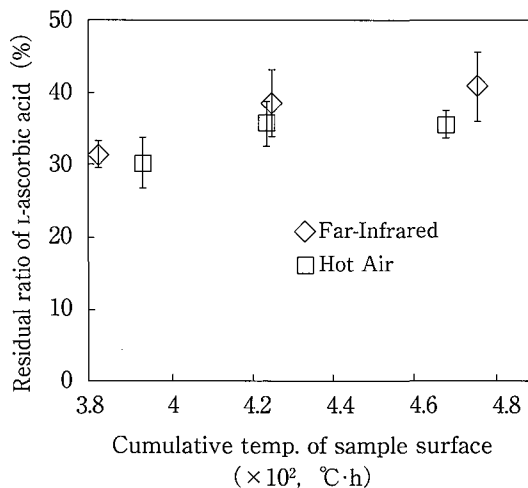


Fig. 7 Relationships between the cumulative sample surface temperature and the residual ratio of L-ascorbic acid

Each value is mean \pm S.D. (n=4).

におけるL-アスコルビン酸の減少を抑制できると考えられる。また、コマツナの遠赤外線乾燥および熱風乾燥におけるL-アスコルビン酸残存率は、積算温度 $4.1 \times 10^2 ^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ 近傍に境界点があることが伺える。すなわち、積算温度が $4.1 \times 10^2 ^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ 以上になるような乾燥条件(例えば、葉面温度が 50°C における乾燥時間は8.3時間程度)を設定することにより、L-アスコルビン酸の減少を抑制できる乾燥条件決定が容易に行える可能性がある。今後、乾燥試料や乾燥法の違いによる積算温度の境界点について詳細な検討が必要であるものの、コマツナの乾燥過程において、積算温度がL-アスコルビン酸の減少の指標となる可能性が示された。

3. 乾燥前後における色彩変化とクロロフィル・カロテノイド成分の関係

乾燥前後における色差 ΔE 、彩度 C^* 、色相角 h° および黄化度 YI の値をTable 3に示す。乾燥前後における色差は、遠赤外線乾燥および熱風乾燥のいずれの乾燥条件においても6.2~8.0で、これは色差の感覚的表現では「大いに異なる」レベルとなる¹⁹⁾。それぞれ有意差は見られなかったものの、葉面温度が上昇する(すなわち、葉面積算温度が少ない)とともに色差の変化量が少なくなる傾向がみられた。一般に、色差が小さいほど品質がよいと判断されている¹⁹⁾ことから、葉面積算温度を小さくするように乾燥させることにより、視覚的な品質劣化を抑制できることが示唆された。また、彩度 C^* が生試料と比べて大となったことから、色素成分の濃縮により色が濃く変化したことがうかがえる。色相角を乾燥前後で比較すると、乾燥後の色相角は乾燥前のそれと比較して小さくなった。 a^*b^* 色度図によると 180° は緑色、 90° は黄色となる¹⁹⁾。本研究における色相角は 180° から 90° の方向へ変化していることから、乾燥処理により色彩が緑色から黄色方向に向かって変化した(黄化)ことが示された。このことは、乾燥後試料の黄化度が乾燥前試料のそれと比較して大となったことから明らかである。

Fig.8に遠赤外線乾燥および熱風乾燥後のカロテノイド成分(ルテイン、 β -カロテン)およびクロロフィル $a+b$ の残存率を示す。黄色成分であるルテインおよび β -カロテンの残存率は50~60%前後であるのに対し、緑色

Table 3 Color changes in fresh and dried Komatsuna leaves by far-infrared drying and hot air drying

	Far-Infrared				Hot air		
	Fresh	Surface Temp. ($^\circ\text{C}$)		Surface Temp. ($^\circ\text{C}$)			
		49.3	53.6	54.5	44.4	50.2	54.3
ΔE		8.03 ± 0.44	6.87 ± 0.41	6.24 ± 0.79	8.00 ± 0.84	7.56 ± 0.65	6.55 ± 0.54
C^*	17.7 ± 0.72	21.3 ± 0.58	21.7 ± 0.59	20.1 ± 0.81	19.4 ± 0.50	21.4 ± 0.45	18.7 ± 0.61
h°	123.3 ± 0.79	111.8 ± 0.57	109.5 ± 0.77	108.9 ± 0.76	111.5 ± 0.57	109.7 ± 0.62	109.5 ± 0.96
YI	54.3 ± 0.92	100.8 ± 3.31	119.3 ± 4.52	120.4 ± 5.87	99.0 ± 4.37	119.4 ± 4.83	104.7 ± 4.22

All values are mean \pm S.D. (n=20-30)

Surface temperature means average temperature during drying.

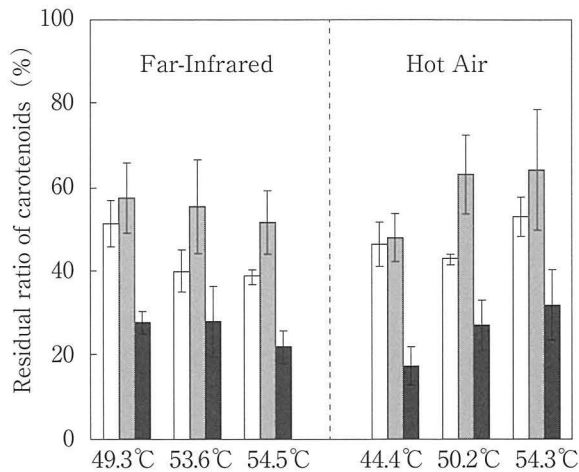


Fig. 8 The residual ratio of carotenoids and chlorophyll by far-infrared drying and hot air drying

□ : Lutein, ■ : β-carotene, ■ : Chlorophyll a+b
Each value is mean ± S.D. (n = 4)

成分であるクロロフィルa, bの残存率は30%前後と低いことが示された。クロロフィルa, bの減少率がカロテノイドよりも大きいことから、コマツナの乾燥処理での黄化は、クロロフィルa, bの大幅な減少が主要因であることが示唆された。クロロフィルa, bはクロロフィラーゼ²⁵⁾, クロロフィルオキシターゼ²⁶⁾により酵素的に、あるいは紫外線²⁷⁾などにより非酵素的に分解され、非常に分解されやすい物質である。青果物保存中の黄化の原因はこれらのクロロフィル分解系がクロロフィルを分解するために起こるとされている^{25)~27)}。今後、乾燥過程におけるクロロフィル分解は酵素的もしくは非酵素的分解のどちらが優勢であるのかを明らかにし、黄化を抑制する方法について検討する必要があると考えられる。

要 約

コマツナを試料として、遠赤外線乾燥および熱風乾燥における乾燥速度および品質変化の温度依存性について検討し、以下の知見を得た。

- ① 含水率変化はいずれの乾燥条件においても指数モデルで表され、乾燥速度定数 k にArrhenius型の温度依存性があることが示された。
- ② L-アスコルビン酸残存率は積算温度 $4.1 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ 近傍に境界点がみられ、積算温度がそれ以上となる乾燥条件では分解を抑制した。
- ③ 色彩変化は葉面の積算温度が小さいほど変化量が小さいことが示され、乾燥に伴う黄化はクロロフィルa, bの大幅な減少が主要因であることが示唆された。
- ④ 温度と時間の2つのパラメータを同時に考慮できる積算温度を品質評価の指標とすることにより、最適乾燥条件の検討の際に有用となる可能性が示唆された。

謝 辞 本研究の一部は、科学研究費補助金(若手研究B, 23780268)の助成により実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

東洋興産株式会社 取締役製造本部長 齊藤義郎氏には遠赤外線乾燥機を使用・改良する際に貴重かつ有益な御助言を頂いた。心より御礼申し上げます。

文 献

- 1) 吉川直樹・天野耕二・島田幸司：日本の青果物消費に伴う環境負荷とその削減ポテンシャルに関する評価、環境システム研究論文集, **35**, 499~509 (2007)
- 2) 加藤真奈美：東日本大震災における宮城県内被災者への栄養食生活支援, ビタミン, **85**, 426~429 (2012)
- 3) 石川秀次：五訂食品成分表, (第一出版, 東京), pp.109~147 (2001)
- 4) 農林統計協会：第86次農林水産省統計表(平成22年~平成23年), (農林統計協会, 東京), p.177, 545 (2012)
- 5) 農山漁村文化協会：野菜園芸大百科21品質・鮮度保持, (農山漁村文化協会, 東京), pp.170~174 (2004)
- 6) 林 弘通：講座 食品の乾燥(第一回) —その歴史と製造技術—, 調理科学, **24**, 333~338 (1991)
- 7) MURAMATSU, Y., TAGAWA, A. and SAKAGUCHI, E.: Thin Layer Drying Model for Cooked Soybeans, 2009 ASABE Annual Intl. Meeting, Paper Number: 095770, 1~8, Nevada (2009)
- 8) 渡辺敦夫・清水 賢：化学技術誌Mol 2月号, (オーム社, 東京), pp.64~72 (1988)
- 9) HEBBAR, H.U., VISHWANATHAN, K.H. and RAMESH, M.N.: Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables, *J. Food Eng.*, **65**, 557~563 (2004)
- 10) 秀永伸作：遠赤外線穀物乾燥機と大豆乾燥への利用, 農業機械学会誌, **63**, 17~19 (2001)
- 11) MANECHO, P., TOJO, S. and WATANABE, K.: Computed Tomographic Analysis of Vegetable during Far Infrared Radiation Drying Process, *J. Soc. Agric. Structures*, **37**, 123~132 (2006)
- 12) VISHWANATHAN, K. H., HEBBAR, U. H. and RAGHAVARAO, K.S. M.S.: Hot Air Assisted Infrared Drying of Vegetables and Its Quality, *Food Sci. Technol. Res*, **16**, 381~388 (2010)
- 13) AFZAL, T.M., ABE, T. and HIKIDA, Y., Energy and quality aspect during combined FIR-convection drying of barley, *J. Food Eng.*, **42**, 177~182 (1999)
- 14) 岡本慎太郎・折笠貴寛・桑嶋学人・菰田俊一・齊藤順一郎・矢野歳和・村松良樹・小出章二・椎名武夫・田川彰男：コマツナの乾燥への遠赤外線の利用, 日本食品科学工学会誌, **59**, 465~472 (2012)
- 15) 武田吉弘・太田保夫：青果物の保存姿勢が品質およ

- び鮮度保持に及ぼす影響, 農業および園芸, **58**, 809~812 (1983)
- 16) 小澤美奈子: スタンダード栄養・食物シリーズ5 食品学—食品成分と機能性—, (東京化学同人, 東京), pp.61~106 (2011)
- 17) SCALA, K.D. and CRAPISTE, G.: Drying kinetics and quality change during drying of red pepper, *LWT—Food Sci. Tech.*, **41**, 789~795 (2008)
- 18) 藤原隆広・熊倉裕史・大田智美・吉田裕子・亀野貞: 市販ホウレンソウのL-アスコルビン酸および硝酸塩含量の周年変動, 園芸学研究, **4**, 347~352 (2005)
- 19) 須賀長市: 耐候光と色彩, (スガ試験機, 東京), pp.197~290 (1988)
- 20) 廣田智子: ピーマンの冷凍加工における収穫時期, ブランチングおよび解凍方法が果皮の色調と硬さに及ぼす影響, 兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告, **59**, 34~35 (2011)
- 21) 満田幸恵・新本洋士・小堀真珠子・津志田藤二郎: 高速液体クロマトグラフィーによる野菜のカロテノイドおよびクロロフィルの同時分析, 日本食品科学工学会誌, **49**, 500~506 (2002)
- 22) 安藤泰雅・折笠貴寛・椎名武夫・五月女格・五十部誠一郎・村松良樹・田川彰男: 調理用トマトの乾燥およびブランチングへのマイクロ波の適用, 日本食品科学工学会誌, **57**, 191~197 (2010)
- 23) MURAMATSU, Y., TAGAWA, A., SAKAGUCHI, E. and KASAI, T.: Water Absorption Characteristics and Volume Change of Milled and Brown Rice During Soaking, *Cereal Chem.*, **83**, 624~631 (2006)
- 24) 保坂秀明: 「食品工学入門」—基礎と操作—, (株式会社化学工業社, 東京), pp.57~79 (1972)
- 25) YMAUCHI, N., YOSHIURA, M. and SHONO, Y., Chlorophyll Degradation in Mitsuha Leaves during Storage, *Food Sci. Tech. Res.*, **42**, 709~714 (1995)
- 26) 秋山 裕・高橋千夏・山内直樹: 大根子葉の黄化時におけるクロロフィル分解系, 日本食品科学工学会誌, **47**, 296~301 (2000)
- 27) 瀬戸美江・佐伯俊子・中西洋子・梶田武俊: 緑葉クロロフィルの分解におよぼす光の影響, 日本調理科学会誌, **23**, 367~372 (1990)
- (平成25年3月6日受付, 平成25年8月5日受理)