

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：11201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23780260

研究課題名(和文) LCA手法を考慮した青果物の遠赤外線乾燥の最適化に関する研究

研究課題名(英文) Study of optimization of far-infrared drying condition for fruit and vegetables considering LCA methods

研究代表者

折笠 貴寛 (ORIKASA, Takahiro)

岩手大学・農学部・准教授

研究者番号：30466007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、遠赤外線乾燥の農産物分野への利用した際の最適乾燥条件の検討に必要な乾燥特性、品質変化、消費電力量について検討を行った。同じ乾燥温度の場合、L-アスコルビン酸残存量は遠赤外線併用乾燥の方が有意に大となった。品質変化の指標として積算温度を評価項目として導入した。キウイフルーツの乾燥過程におけるL-アスコルビン酸は一次反応速度式で、抗酸化活性は0次反応速度式で近似された。また、キャベツの遠赤外線乾燥における消費電力量は、熱風乾燥と比べて約17%少なくなることも示された。これらの結果は、遠赤外線による青果物の乾燥過程における品質の管理や制御、または最適乾燥条件の検討に有益となると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We discussed drying characteristics, quality changes, energy consumption of fruit and vegetables during Far-infrared drying, which were needed to determine the optimum drying condition. For the same drying-rate constants of Komatsuna leaves, the residual ratio of L-ascorbic acid after far-infrared drying was significantly higher than that after hot-air drying. Cumulative temperature was used as an indicator of quality change. The L-ascorbic acid changes in the kiwifruit samples during the hot air drying process followed first order reaction kinetics. Changes in the sample hardness and antioxidant activity were represented by zero-order reaction kinetics. Energy consumption for far-infrared drying was approximately 17% lesser than that for hot-air drying. These results were useful for not only management and control of quality during dried products producing process, but also determining the optimum drying condition of it.

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：遠赤外線乾燥 L-アスコルビン酸 抗酸化活性 消費電力量 積算温度 ライフサイクルアセスメント
ブランチング 反応速度

1. 研究開始当初の背景

青果物は形状不良などによる廃棄ロスが収穫物に対して10%程度発生しており(吉川ら, 環境システム論文集, 35, 499-509, 2007), その対策は重要な問題として位置づけられている。篤農家においても, 規格外品農産物の商品化を目的とした高品質加工処理法開発の要望が非常に強い。青果物加工処理の1つとして, 乾燥処理が考えられる。乾燥処理を施すことにより, 廃棄されていた青果物を乾燥食品として商品化できるため, 青果物の廃棄ロスを大幅に削減する効果が期待される。

一方, 新しい食品の乾燥法として遠赤外線乾燥が注目されつつある。この乾燥法は内部加熱方式であることが特徴であり, 照射した遠赤外線を水などの電気極性を持つ物質が吸収すると振動を起こし, 発生した熱により水分を蒸発させる乾燥方法である。熱風などの方法と比べて熱伝達率が数十倍程度も大きく, エネルギー効率が良好であるため, 環境にも優しい乾燥法と期待される。これまで, 自動車塗料の乾燥など遠赤外線乾燥の工業分野への利用は進んでいるが, 食品分野において遠赤外線乾燥を適用した例は非常に少ない。近年, 遠赤外線乾燥の食品への適用が一部で試みられつつある(例えば, Zhu et al., Processing and quality characteristics of apple slices processed under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with intermittent heating, J. Food Eng., 97, 8-16, 2010) もの, 青果物を対象とした遠赤外線乾燥特性を定量的に解析した理論の構築はほとんど行われていない(遠赤外線乾燥, 橋本篤, 「乾燥工学の進展」化学工学会編, pp.35-43, 2000)。Zhu et al.の報告においても, アスコルビン酸, 色, 酵素活性など品質に関する検討はなされているものの, 遠赤外線乾燥特性の検討までは行われていない。

また, 近年, ライフサイクルアセスメント(以下, LCA)が注目されており, LCA手法を用いて低炭素型社会に向けた最適システムの構築を目的とした環境負荷の解析が広く行われているが, 食と農の分野においてLCAを適用した例は少なく, 青果物の遠赤外線乾燥における投入エネルギーに関する評価手法も未確立であるため, コストや環境負荷にも配慮した遠赤外線乾燥の最適システムの理論構築にまでは至っていない。

2. 研究の目的

研究代表者はこれまでマイクロ波乾燥過程における乾燥理論の構築を目的とし, 様々な青果物のマイクロ波乾燥特性について解析を行ってきた(例えば, 折笠ら, 日本食品科学工学会誌, 55(7), 350-354, 2008)。この先行研究を受けて, 平成21年度まで「マイクロ波を用いた青果物ブランチング最適化システムの開発」(平成20~21年度科研費・若

手研究(スタートアップ)に採択)を実施してきた。これらの研究課題実施により, 内部加熱であるマイクロ波を青果物に適用することの有用性を示したが, マイクロ波は水に吸収されやすく, その温度上昇性によってかえって品質を損ねる懸念があることも示唆した。そのため, マイクロ波と同じ電磁波を用いた内部加熱方式であるが, マイクロ波よりは温度上昇性が弱い遠赤外線を用いることにより, マイクロ波乾燥の欠点を防止した高効率・高品質な乾燥が可能ではないかと着想した。

本研究では, 葉菜類, 果菜類, 根菜類などを試料として遠赤外線乾燥処理を行い, 以下の4つのステップにより検討を行った。

(1) 乾燥特性(含水率変化, 体積変化, 収縮など)を測定し, 拡散理論などを用いて含水率予測モデルを構築する。

(2) 酵素活性および栄養成分変化を測定し, その変動状況について速度論的解析を行う。

(3) コストおよび環境負荷について, LCA手法を用いた解析を行う。

(4) 含水率・品質予測モデルおよびコスト・環境負荷の解析結果を取りまとめ, 環境負荷を考慮した青果物遠赤外線乾燥の最適条件について検討する。

以上より, 青果物の遠赤外線乾燥の最適条件導出に資する基礎データの収集を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 乾燥特性の解析および含水率予測モデルの構築

遠赤外線乾燥装置を用いて乾燥処理を行い, 含水率, 体積, 表面積などの乾燥特性を測定し, 拡散理論などを用いてデータを解析する。また, 試料温度を測定し, 拡散係数の温度依存性について検討を加え, 含水率予測モデルを構築する。

(2) 品質変化予測モデルの最適化

酵素活性, 抗酸化活性, 機能性成分などの品質変化を測定し, 遠赤外線乾燥が品質に及ぼす影響について調査する。機能性成分としてアスコルビン酸, リコピンおよびカロテン含有量をそれぞれ測定する。得られた測定結果を反応速度論により解析し, 遠赤外線乾燥における品質変化予測モデルの最適化を行う。また, 色彩, 糖酸度, 硬度など乾燥青果物の品質に直接影響する項目についても測定を行い, これらの結果を加味することにより, 品質の低下を最小限にする遠赤外線乾燥条件を明らかにする。

(3) LCA手法によるコストおよび環境負荷の解析

決定された最適条件に従って青果物を乾燥し, エネルギー投入量などの一次データを取得する。これらのデータをLCA手法により解析し, エネルギー投入量の削減効果について, 熱風や真空凍結乾燥など他の乾燥法の解析結果と比較することにより検討する。こ

これらの項目を総合し、コストや環境負荷を低減しつつ、青果物の品質を保持できる新たな遠赤外線乾燥技術を開発する。なお、測定に用いられる試料は、生鮮 (fresh), プランチング無処理 (Unblanched; 以下, UB), 熱湯浸漬処理 (Hot Water; 以下, HW), マイクロ波処理 (Micro Wave; 以下, MW), 乾燥法は遠赤外線乾燥 (Far Infrared; 以下, FIR) および熱風乾燥 (Hot Air; 以下, HA) とした。

4. 研究成果

(1) コマツナの乾燥への遠赤外線の利用

コマツナを遠赤外線乾燥および熱風乾燥した際の品質変化 (色彩変化, L-アスコルビン酸, β -カロテンおよびルテイン含有量変化) および乾燥過程における消費電力量について調査した。その結果, 乾燥終了時の試料表面温度を同じにすれば, 遠赤外線乾燥および熱風乾燥の乾燥速度は同程度になり, 含水率変化はいずれの乾燥法においても減率乾燥第一段で表されることが示された (図1)。

乾燥速度が同じ場合, 遠赤外線乾燥は乾燥後の L-アスコルビン酸残存率が熱風乾燥のそれと比べて有意 ($p < 0.05$) に大であり, 遠赤外線乾燥法は L-アスコルビン酸分解を抑制する可能性があることが示された (図2)。

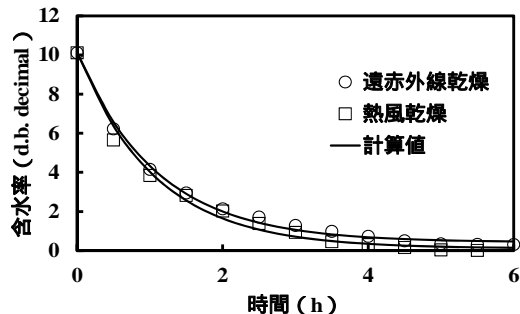


図1 遠赤外線乾燥および熱風乾燥におけるコマツナの含水率変化

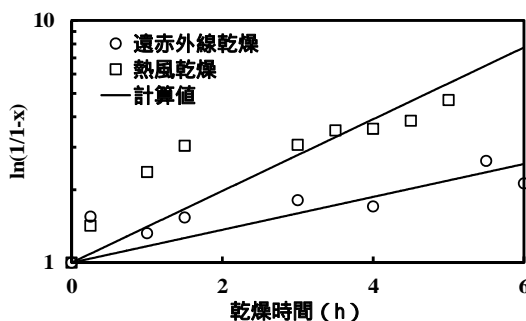


図2 乾燥コマツナの L-アスコルビン酸残存率変化 (n=4)

色相角の黄色方向への変化は, β -カロテンおよびルテインの濃縮による可能性が示唆された (図3)。遠赤外線乾燥は単位水分の蒸発に必要な消費電力量が熱風乾燥のそれと比較して有意 ($p < 0.01$) に少なく, 遠赤外線乾燥法を用いることで, 熱風乾燥法よりも 17%程度小さい電力量で乾燥青果物を製造できる可能性が示された (表1)。以上より, 遠赤外線乾燥は熱風乾燥よりも, コマツナ乾燥への適用が有効であることが示された。

(2) 積算温度を用いた品質評価と乾燥条件の最適化

コマツナの遠赤外線乾燥と熱風乾燥における品質変化 (色彩変化, L-アスコルビン酸, カロテノイドおよびクロロフィル含有量) と乾燥速度を測定した。乾燥空気温度は 44 から 55 間の3段階とした。さらに, 品質変化の指標として積算温度を評価項目として導入した。その結果, 含水率経時変化は指数モデルで表され, 乾燥速度定数 k と平均葉面温度間には Arrhenius 型の温度依存性があるこ

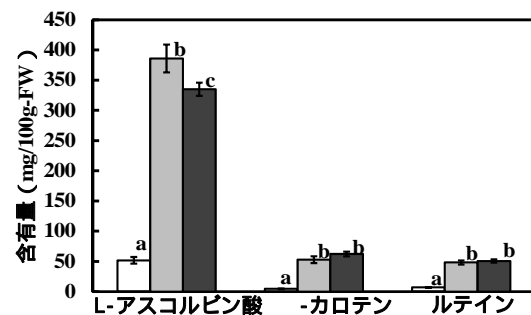


図3 遠赤外線乾燥および熱風乾燥前後のコマツナ中の L-アスコルビン酸, β -カロテンおよびルテインの含有量
乾燥前; 遠赤外線乾燥; 熱風乾燥

図中のバーは標準誤差を表す (n=12) 同一成分内の異なる英小文字 (a と b および a と c) 間に有意差 ($p < 0.01$) あり

表1 コマツナの各乾燥過程における単位水分の蒸発に必要な電力量および潜熱顕熱比

	単位水分の蒸発に必要な電力量 E_v (kJ/g)	潜熱顕熱比
遠赤外線乾燥	67.8±0.2 ^a	22.6±1.2 ^{aa}
熱風乾燥	81.4±1.5 ^b	19.3±0.6 ^{bb}

平均値 ± 標準誤差を表す (n=10)

異なる英小文字 (a と b) 間で有意差 ($p < 0.01$) あり

異なる英小文字 (aa と bb) 間で有意差 ($p < 0.05$) あり

表2 コマツナの色彩変化 (n=20-30)

	Far-Infrared			Hot Air			
	Fresh	49.3	53.6	54.5	44.4	50.2	54.3
E		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
H ^a		123.3±0.79	111.8±0.57	109.5±0.77	108.9±0.76	111.5±0.57	109.7±0.62
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		

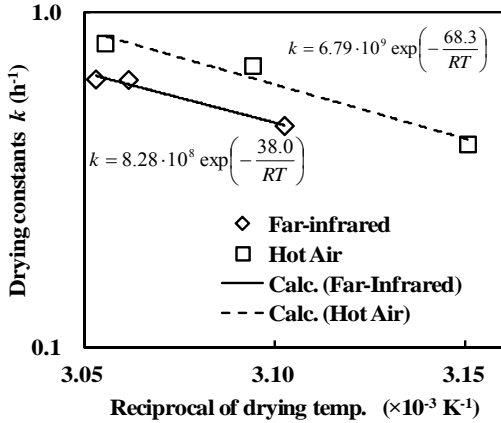


図4 コマツナの乾燥過程における乾燥速度定数のアレニウスプロット

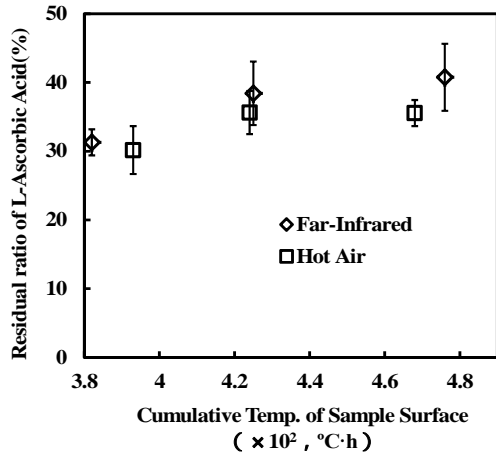


図5 試料表面積算温度とL-アスコルビン酸残存率の関係 (n=4)

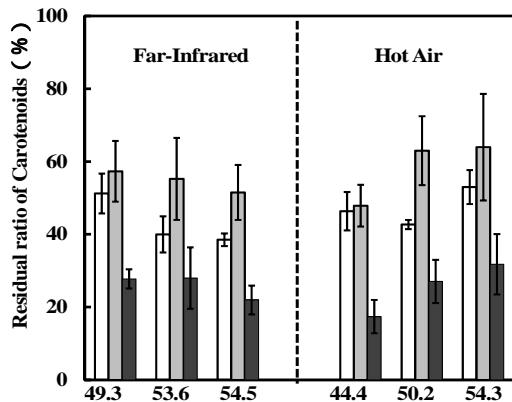


図6 乾燥コマツナのカロテノイドおよびクロロフィル残存率 (n=4)

: Lutein, : -carotene, :

Chlorophyll a+b

とが示された(図4). L-アスコルビン酸残存率は積算温度 $4.1 \times 10^2 \cdot h$ 近傍に境界点が見られ, 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(図5). 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(表2), 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(図6). 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.

(3) ブランチング処理がキャベツの遠赤外線乾燥過程における乾燥特性と品質変化に及ぼす影響

熱湯およびマイクロ波によるブランチング処理が, 遠赤外線乾燥および熱風乾燥により製造された乾燥キャベツの水分蒸散速度および品質変化に与える影響を検討したところ, 以下の知見が得られた.

いずれのブランチングにおいても, 遠赤外線および熱風乾燥試料の含水率変化は指数モデルと Page 式の組み合わせにより表されることが示された(図7).

含水率のモデル式のパラメータである乾燥速度定数を比較したところ, ブランチング処理は, その後の乾燥における水分蒸散速度を 1.2~3 倍程度増加させることが示された. これは, マイクロ波ブランチングにおいては表面積収縮抑制効果, 熱湯ブランチングでは

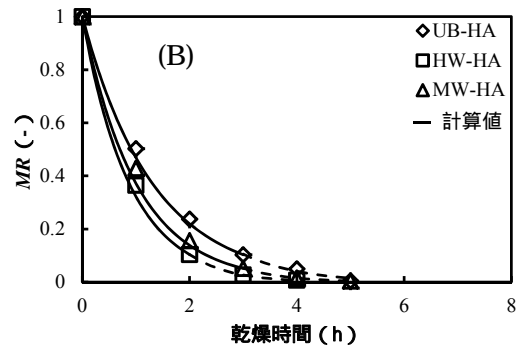
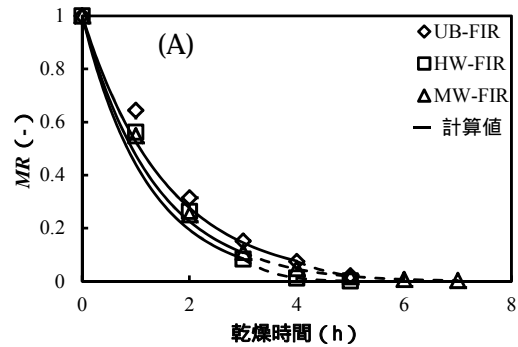


図7 各乾燥過程における試料含水率比

(A) および (B) はそれぞれ遠赤外線乾燥, 熱風乾燥を示す. 実線は指数モデルによる計算値, 破線は Page 式による計算値を示す.

表3 各乾燥前後における色差

	FIR			HA		
	UB	HW	MW	UB	HW	MW
E	7.2±1.3	17.9±1.9	10.3±1.1	4.3±1.5	10.4±1.1	8.0±0.7

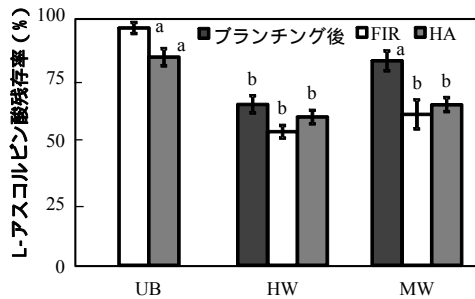


図8 各ブランチングおよび乾燥後の試料のL-アスコルビン酸残存率
図中のバーは標準誤差を示す (n=3)
異なる英小文字間に有意差 (p<0.05) あり

軟化と表面積収縮抑制による相乗効果であると推察された。

ブランチング処理した乾燥キャベツのL-アスコルビン酸残存率は、無処理のそれと比較して有意 (p<0.05) に低くなったが、マイクロ波ブランチング処理を用いることにより、熱湯ブランチング処理と比較してL-アスコルビン酸の減少を抑制できる可能性が示された (図8)。

ブランチング処理により乾燥キャベツの色差は大きくなり、鮮やかな緑を呈した (表3)。

以上より、ブランチング処理は乾燥キャベツの品質を保持しつつ乾燥時間を短縮させる可能性が示された。

(4) キウイフルーツの乾燥過程における品質変化の変動解析

熱風および減圧乾燥の2つの乾燥方法について3段階の温度条件 (50, 60, 70) を設定し、乾燥に伴うキウイフルーツの品質変化 (含水率, 硬度, L-アスコルビン酸含有量, DPPH ラジカル消去活性) について、反応速度論を用いた解析を行った。その結果、乾燥後の硬度, L-アスコルビン酸残存率および DPPH ラジカル消去活性比は、それぞれ約2~8倍, 約80~90%, 約5倍となった。これらのデータを基に、品質変化について反応速度論を用いて解析したところ、キウイフルーツの熱風乾燥過程における硬度変化 (図9), L-アスコルビン酸変化 (図10) は1次反応速度式, DPPH ラジカル消去活性 (図11) は0次反応速度式によりそれぞれ表されることが示された。これらの結果は、遠赤外線乾燥による乾燥青果物の製造過程において品質の管理や制御, または最適乾燥条件の検討に有益となると考えられる。

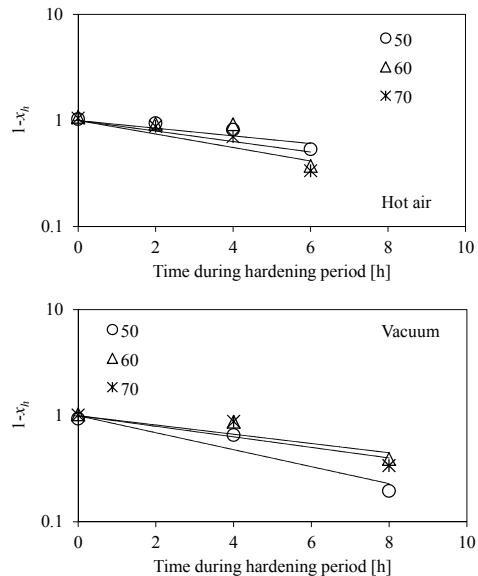


図9 乾燥キウイフルーツの硬化率経時変化

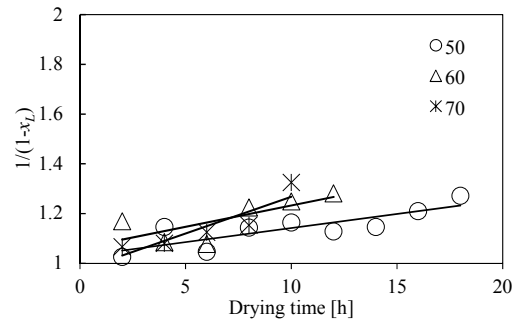


図10 乾燥キウイフルーツのL-アスコルビン酸増加比の経時変化

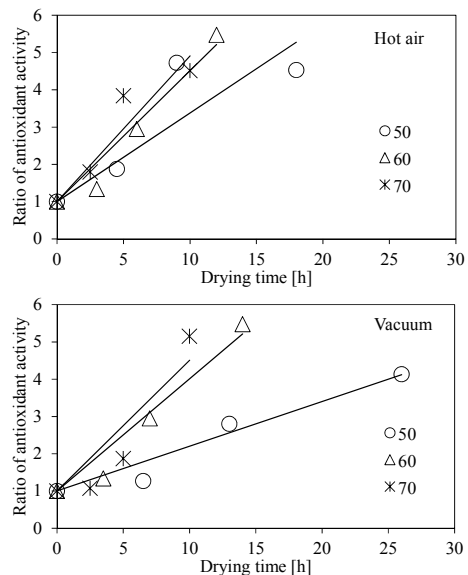


図11 乾燥キウイフルーツのDPPH ラジカル消去活性比の経時変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

1. Takahiro Orikasa, Shoji Koide, Shintaro Okamoto, Tepei Imaizumi, Yoshiki Muramatsu, Jun-ichi Takeda, Takeo Shiina, Akio Tagawa, Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices, Journal of Food Engineering, 査読有, 125, 51-58, 2014.
2. 渡邊高志, 折笠貴寛, 佐々木邦明, 小出章二, 武田純一, ブランチング処理がカットキャベツの遠赤外線および熱風乾燥特性に及ぼす影響, 農業食料工学会東北支部報, 査読無, 60, 47-50, 2013.
3. 岡本慎太郎, 折笠貴寛, 畑中咲子, 菰田俊一, 齊藤順一郎, 富樫千之, 村松良樹, 小出章二, 椎名武夫, 田川彰男, 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, 日本食品保蔵科学会誌, 査読有, 39(6), 311-318, 2013.
4. Takahiro Orikasa, Long Wu, Poritosh Roy, Yoshiki Muramatsu, Toshikazu Yano, Takeo Shiina and Akio Tagawa, Vacuum Drying Characteristics of Kiwifruit and Analysis of Drying Shrinkage, Journal of the Society of Agricultural Structures, Japan, 査読有, 43(4), 145-151, 2012.
5. 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, 査読有, 59(9), 465-472, 2012.

〔学会発表〕(計8件)

1. 渡邊高志, 折笠貴寛, (他4名, 2番目), ブランチング処理がキャベツの乾燥過程における乾燥速度増加に及ぼす影響, 第72回農業機械学会年次大会, 2013年9月11日, 帯広畜産大学(北海道)
2. Takahiro Orikasa, Shintaro Okamoto, (他7名, 1番目), Analysis of temperature dependency of quality change during far-infrared drying of komatsuna leaves. VI International Conference on Managing Quality in Chains (MQIC 2013), 2013年9月2日~6日, Cranfield, UK
3. 折笠貴寛, 桔梗はるか, (他4名, 1番目), キウイフルーツの乾燥過程における各種反応速度定数の温度依存性, 農業機械学会東北支部平成25年度支部大会, 2013年8月22日, 福島県農業総合センター(福島)
4. 渡邊高志, 折笠貴寛, 小出章二, ブランチング処理の違いがキャベツの乾燥過程における乾燥速度および品質変化に

及ぼす影響, 農業機械学会東北支部平成25年度支部大会, 2013年8月22日, 福島県農業総合センター(福島)

5. 岡本慎太郎, 折笠貴寛, (他8名, 2番目), コマツナの遠赤外線乾燥における乾燥速度と品質変化の温度依存性, 農業環境工学関連学会2012年合同大会, 2012年9月12日, 宇都宮大学(栃木)
6. 岡本慎太郎, 折笠貴寛, (他9名, 2番目), コマツナの遠赤外線乾燥における品質変化および電力効率の解析, 日本食品科学工学会第59大会, 2012年8月31日, 藤女子大学(北海道)
7. 折笠貴寛, 太田香菜実, (他6名, 1番目), キウイフルーツの乾燥に伴う品質変化予測モデル構築に関する予備的解析, 平成24年度農業機械学会東北支部大会, 2012年8月30日, 宮城大学(宮城)
8. 岡本慎太郎, 折笠貴寛, (他6名, 2番目), 葉菜類の乾燥への遠赤外線の利用, 日本食品科学工学会第58回大会, 2011年9月11日, 東北大学(宮城)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

折笠 貴寛 (ORIKASA, Takahiro)

岩手大学・農学部・准教授

研究者番号: 30466007

(2)研究協力者

田川 彰男 (TAGAWA, Akio)

千葉大学・大学院園芸学研究科・教授

研究者番号: 90216804

椎名 武夫 (SHIINA, Takeo)

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・ユニット長

研究者番号: 40353974

小出 章二 (KOIDE, Shoji)

岩手大学・農学部・准教授

研究者番号: 70292175