

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23580350

研究課題名(和文) 熱および物質移動を考慮した大容量MAP

研究課題名(英文) Large Scale Modified Atmosphere Packaging with Heat and Mass Transport

研究代表者

疋田 慶夫 (HIKIDA, YOSHIO)

愛媛大学・農学部・教授

研究者番号：50127908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：O₂、CO₂、N₂および水蒸気の物質移動に加え、包装内部における青果物の呼吸作用による呼吸熱の発生、蒸散作用による蒸発潜熱の吸収、水蒸気の凝縮に伴う凝縮潜熱の発生、および包装資材を通しての伝導熱を考慮して、大容量MAPのための数学モデルを提示した。また、この数学モデルに基づいて、外気の温湿度が変動する場合の非定常計算を行うシミュレーション・プログラムを作成し、計算結果を実験により検証した。

研究成果の概要(英文)：A mathematical model for large scale modified atmosphere packaging was developed. This model included mass transport for O₂, CO₂, N₂, and water vapor and heat transport for respiration heat by packed product, latent heats by transpiration of the product and water vapor condensation in the package and transmission heat through the packaging material. The simulation program for dynamic change in temperature and humidity of outside the package was obtained based on the mathematical model. The computational results using the program were validated experimentally.

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：MAP 包装 貯蔵 青果物

1. 研究開始当初の背景

低温下での少量 MAP については多くの研究成果があり、適切な MA 条件、包装内ガス組成のシミュレーション、各種包装資材の特性など多くの知見が蓄積されている。しかしながら、この少量 MAP の技術をそのまま常温下の大容量 MAP に適用するのは困難で、克服しなければならない多くの課題がある。すなわち、常温下であるため包装青果物の呼吸熱を無視することができず、呼吸作用と蒸散作用および包装資材のガス透過性に基づく O_2 、 CO_2 、 N_2 、水蒸気の物質移動に加えて、熱移動を加味した大容量 MAP のための数学モデルを確立する必要がある。また、外気温の変動を考慮するため、従来のような定常計算はできず、非定常での計算が必要となる。一方、包装資材の選定においては、ガス透過性に加えて伝熱特性を考慮した選定が必要になることも予想される上に、包装内ガス濃度の勾配を緩和するための Diffusion Channel の導入が必要になる可能性もある。

大容量の MAP は、そのガス制御機能と保湿機能により低温貯蔵においても有効な品質保持技術になるものと考えられるが、未だ研究例は少なく、今後の研究による発展が期待される。

2. 研究の目的

(1) これまでの研究によって得られた、無孔あるいは有孔フィルムによる包装時の水蒸気を含むガス移動を表現する数学モデルに、包装内部での呼吸熱の発生と包装資材の伝熱特性および資材を通しての熱移動を加味して大容量 MAP のための数学モデルを提案する。

(2) 上記(1)で得られた数学モデルに基づき、外気温の温湿度が変動する場合の非定常計算シミュレーション・プログラムを作成する。ここでは、包装内部での呼吸熱の発生と包装資材の熱貫流率を加味する。

(3) 得られた大容量 MAP のための数学モデル

とシミュレーション・プログラムの妥当性を室内実験により検証する。シミュレーションにおいては、対象とするカンキツの呼吸および蒸散モデルが必要になるので、これらを計測する。

(4) 生産地での実証試験により、導入の可能性について検討する。

3. 研究の方法

(1) これまでの段階で完成している O_2 、 CO_2 、 N_2 、水蒸気の物質移動の数学モデルに、包装内部での呼吸熱の発生と包装資材を通しての熱移動を表現する方程式を導入して、大容量 MAP における数学モデルを作成する。このモデルを基に、環境の温湿度が変化する条件下の非定常計算のシミュレーション・プログラムを完成させる。

各種包装資材の伝熱特性として熱貫流率の測定を行う。また、包装内部で発生するガス濃度の勾配を実験により測定し、Diffusion Channel を導入することの適否を検討する。

シミュレーションにより計算される包装内の O_2 、 CO_2 、 N_2 、水蒸気濃度と温度、湿度の値を実験により検証する。

(2) 晩柑類の品種は多様であるため、品種を変更して、シミュレーションによる計算結果を実測値により検証する。この実験においては、呼吸モデルと蒸散モデルの測定に加えて、貯蔵期間中の含有成分や色彩などの変化、および果皮障害の発生状況を確認する。

(3) 完成した大容量 MAP のための数学モデルとシミュレーション・プログラムを利用して、生産地の貯蔵環境における適切な包装形態を検討する。

4. 研究成果

(1) MAP 包装系における熱および物質移動

図 1 に青果物、包装内空気、包装資材よりなる MAP 包装系の模式図を示す。本研究では、青果物からの呼吸熱の発生、蒸散作用による蒸発潜熱の吸収、包装内水蒸気の凝縮による凝縮潜熱の発生、包装資材を通しての伝

導熱を考慮することとした。

一方、青果物による O₂ の吸収と CO₂ の発生、および水蒸気の発生と、包装資材および有孔部における O₂, CO₂, N₂, 水蒸気の透過を考慮することにした。ここで、有孔部における物質移動は拡散と、包装内空気の体積変化による対流によって生じるものとした。

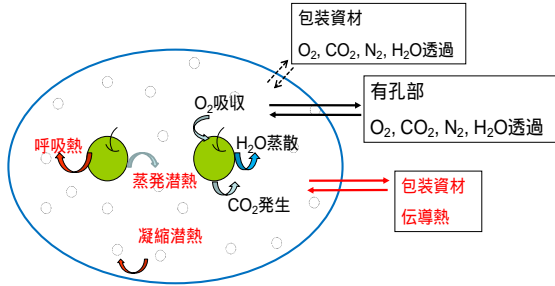


図1 MAP 包装系

(2) MAP 包装系における熱および物質移動の数学モデル

図1の熱および物質移動による収支に基づいて、次式の数学モデルを作成した。熱収支は(5)式で示した。

$$\frac{dV_o(t)}{dt} = (nD_o + AK_o) \left(P_o - P_r \frac{V_o(t)}{V_o(t) + V_c(t) + V_N(t) + V_H(t)} \right) - \delta_o M_f R_{O_2} + C_o(t)Q \quad (1)$$

$$\frac{dV_c(t)}{dt} = (nD_c + AK_c) \left(P_c - P_r \frac{V_c(t)}{V_o(t) + V_c(t) + V_N(t) + V_H(t)} \right) + \delta_c M_f R_{CO_2} + C_c(t)Q \quad (2)$$

$$\frac{dV_N(t)}{dt} = (nD_N + AK_N) \left(P_N - P_r \frac{V_N(t)}{V_o(t) + V_c(t) + V_N(t) + V_H(t)} \right) + C_N(t)Q \quad (3)$$

$$\frac{dV_H(t)}{dt} = (nD_H + AK_H) \left(P_H - P_r \frac{V_H(t)}{V_o(t) + V_c(t) + V_N(t) + V_H(t)} \right) + \delta_H M_f T_{H_2O} + C_H(t)Q \quad (4)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{U} \{ 3600AH(T_a - T) + \alpha MR_{CO_2} - \beta MT_{H_2O} + \beta C_{nd} \} \quad (5)$$

$V_o(t), V_c(t), V_N(t), V_H(t)$: 包装内 O₂, CO₂, N₂, 水蒸気の体積 (10⁻⁶ m³)

A : 包装資材 (フィルム) の表面積 (m²)

n : 孔の個数 (個)

D_o, D_c, D_N, D_H : 孔 1 個当り O₂, CO₂, N₂, 水蒸気の有効ガス透過 (10⁻⁶ m³ / h kPa)

K_o, K_c, K_N, K_H : 包装資材 O₂, CO₂, N₂, 水蒸気の透過度 (10⁻⁶ m³ / m² h kPa)

P_o, P_c, P_N, P_H : 外気 O₂, CO₂, N₂, 水蒸気の分圧 (kPa)

P_r : 包装内の全圧 (kPa)

$\delta_o, \delta_c, \delta_H$: O₂, CO₂, 水蒸気の比体積 (m³ / kg)

M_f : 青果物の質量 (kg)

R_{O_2}, R_{CO_2} : O₂ 吸収速度と O₂ 排出速度 (10⁻⁶ kg / kg h)

T_{H_2O} : 蒸散速度 (10⁻⁶ kg / kg h)

Q : 有孔部における流量 (10⁻⁶ m³ / h)

$C_o(t), C_c(t), C_N(t), C_H(t)$: O₂, CO₂, N₂, 水蒸気の組成 (fraction)

T : 包装系 (青果物・包装内空気・包装資材) の温度 ()

T_a : 外気の温度 ()

H : 包装資材の熱貫流率 (kW / m² K)

M : 包装系の質量 (kg)

C_{nd} : 水蒸気凝縮量 (10⁻⁶ kg / h)

U : 包装系の熱容量 (kJ / K)

α : $\frac{2872}{6 \times 44 \times 10^3}$ (kJ / 10⁻⁶ kg)

β : 0.00245 (kJ / 10⁻⁶ kg), 20 における水の蒸発潜熱

t : 時間 (h)

(5)式の包装系における熱収支については、包装資材を通しての伝導熱量、青果物の呼吸熱、蒸散による蒸発潜熱、水蒸気の凝縮による凝縮潜熱が、包装系の受熱あるいは放熱量に等しいとする次式より導いた。

$$3600AH(T_a - T)dt + \alpha MR_{CO_2}dt - \beta MT_{H_2O}dt + \beta C_{nd}dt = UdT$$

A : 包装資材の表面積 (m²)

T : 包装系 (青果物・包装内空気・包装資材) の温度 ()

T_a : 外気の温度 ()

H : 包装資材の熱貫流率 (kW / m² K)

M : 包装系の質量 (kg)

R_{O_2}, R_{CO_2} : O₂ 吸収速度と CO₂ 排出速度 (10⁻⁶ kg / kg h)

T_{H_2O} : 蒸散速度 (10⁻⁶ kg / kg h)

C_{nd} : 水蒸気凝縮量 (10⁻⁶ kg / h)

U : 包装系の熱容量 (kJ / K)

α : $\frac{2872}{6 \times 44 \times 10^3}$ (kJ / 10⁻⁶ kg)

α は $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 686 \text{ kcal}$ (2872 kJ) を基に算出した。

β : 20 における水の蒸発潜熱 0.00245 (kJ / 10⁻⁶ kg)

β は水の蒸発潜熱 $L = 597 - 0.58\theta$ (kcal / kg), θ () より計算した。

t : 時間 (h)

(3) シミュレーション・プログラムによる計算の概要

図2に計算機による計算の概要を示す。

t(h)の時間間隔で、変動する包装外大気のと湿度を読み込み、温度変化による包装内の水蒸気凝縮量などを計算した後、数学モデルに4次のルンゲ・クッタ法による dt(h)間隔の数値積分を適用して、対流を考慮した包装内 O₂, CO₂, N₂, 水蒸気の体積、積算蒸散量、積算 CO₂ 排出量、包装系の温度、包装内の相対湿度と絶対湿度、包装内空間体積を計算する。以降は、外気データの終末値までこの計算を繰り返すものである。

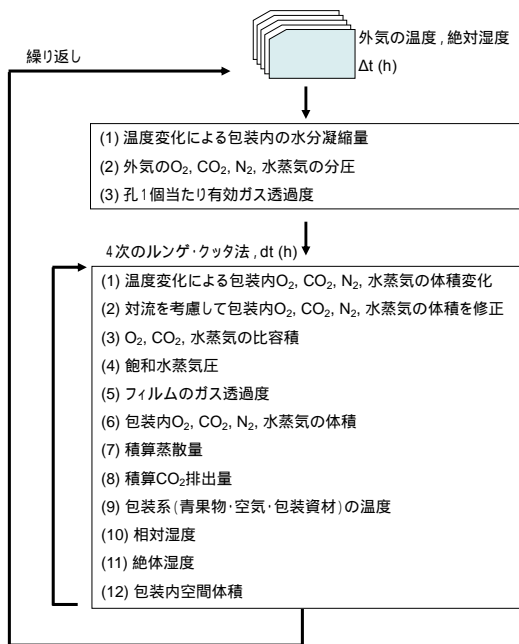


図2 計算の概要

(4) 包装内のガス濃度分布の測定

20kg 入りコンテナに収納できる包装容器を想定し、厚さ 0.1mm のポリエチレンフィルムにより、図3に示す容器を作製した。直径 1mm の孔 2 個と、底部にはマチを設けた。タンゴール清見果実 11.2kg を包装し、開口部をシーラーで密閉した後、10 で 2 日間、5 で 5 日間ガス濃度の変化を測定した。測定点は、図に示した外周部の中段、中央部の上・中・下段の 4 カ所である。内径 1mm のポリエチレンチューブを各測定点に挿入・固定して、外部よりガスサンプルを採取した。

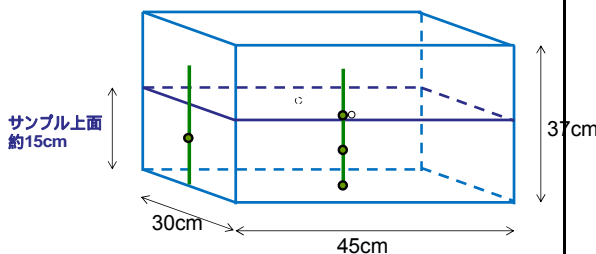


図3 作成した包装容器と測定点

10 および 5 における包装内 O₂ と CO₂ 濃度の変化を図4に示す。O₂, CO₂ 濃度とも 4 カ所の測定点における測定値がほぼ一致して変化し、20kg 入りコンテナサイズの包装

容器では、包装内部でのガス濃度の分布はほぼ均一と見なせることが分かった。

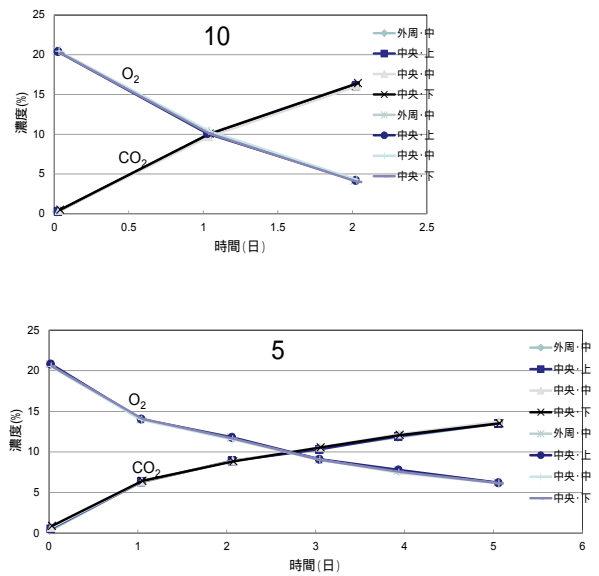


図4 各測定点における O₂, CO₂ 濃度の変化

(5) 包装資材の熱貫流率の測定

本研究では包装資材の伝熱特性を熱貫流率で表すことにしたが、図5に示す測定装置により各種資材の熱貫流率を測定した。縦横 50cm、高さ 30cm の木枠の中に電気ヒーターを設置し、上面を包装資材でカバーして、内側と外側の温度差を熱電対で測定した。同時に、汎用熱流計により資材を通過する熱流束を測定した。温度差と熱流束による熱貫流率の計算は次式に依った。

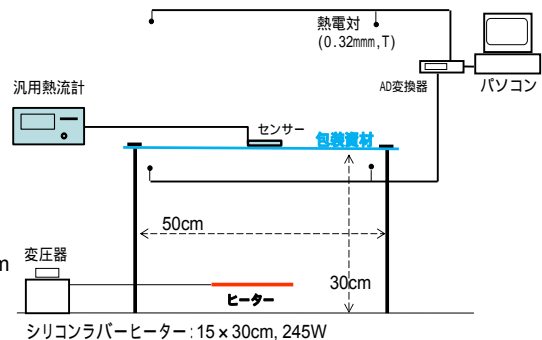


図5 測定装置の概略図

$$H = Q / (T_i - T_o)$$

H : 熱貫流率 ($kW / m^2 K$)

Q : 熱流束 (kW / m^2)

$T_i - T_o$: 温度差 (K)

(6) シミュレーション・プログラムによる計算結果の検証 (タンゴール清見)

供試材料と包装様式

L サイズを中心に, 2L と M サイズが混合したタンゴール清見果実を使用した。厚さ 0.12mm, 縦 55×横 50cm の低密度ポリエチレンフィルム袋に直径 5mm の孔を設け (片側 2, 5, 10, 50, 100 個), それぞれ約 10kg の試料を密封して 5 種類の試験区を作成した (試験区 ~)

供試材料の呼吸速度と蒸散速度

清見果実の O₂ 吸収速度, CO₂ 排出速度と蒸散速度は次式によるものとした。

$$R_{O_2} = 1.304 \times 10^{17} \exp\left(\frac{-1.061 \times 10^4}{T}\right)$$

$$R_{CO_2} = 5.440 \times 10^{16} \exp\left(\frac{-1.029 \times 10^4}{T}\right)$$

R_{O₂}: O₂ 吸収速度 (10⁻⁶ kg / kgh)

R_{CO₂}: CO₂ 排出速度 (10⁻⁶ kg / kgh)

T: 温度 (K)

Techavises N. and Hikida Y., 2008, *J. Food Eng.*, 85, 94~104
5 - 25 , 0.012 - 0.025mm

$$T_{H_2O} = 224.1VPD$$

T_{H₂O}: 蒸散速度 (10⁻⁶ kg / kgh)

VPD: 果実表面と大気との間の水蒸気圧差 (kPa)

Techavises N. and Hikida Y., 2008, *J. Food Eng.*, 85, 94~104
5 - 25 , 0.012 - 0.025mm

フィルムのガス透過度と孔の有効ガス透過度

フィルムの透過度は 5 および 25 下で測定し, 次の Arrhenius の式で示した。孔 1 個当たりの有効ガス透過度は TECHAVISES and HIKIDA による実験式に依った。

$$K_o = \exp\left(\frac{-3.63 \times 10^3}{T} + 12.1\right)$$

$$K_c = \exp\left(\frac{-4.63 \times 10^3}{T} + 16.8\right)$$

$$K_N = \exp\left(\frac{-4.96 \times 10^3}{T} + 16.4\right)$$

$$K_H = \exp\left(\frac{-4.15 \times 10^3}{T} + 16.9\right)$$

K_o, K_c, K_N, K_H: フィルム O₂, CO₂, N₂, 水蒸気の透過度 (10⁻⁶ m³ / m²hkPa)

T: 温度 (K)

$$D_i = 2.98 \times 10^{-2} d^2 + 5.37 \times 10^{-1} d + 8.22 \times 10^{-1}$$

D_i: 孔 1 個当たりの O₂, CO₂, N₂, 水蒸気の有効ガス透過度 (10⁻⁶ m³ / hkPa)

d: 孔の直径 (mm)

Techavises N. and Hikida Y., 2008, *J. Food Eng.*, 85, 94~104
5 - 25 , 0.012 - 0.025mm

包装資材の熱貫流率, 包装系の熱容量と熱

包装資材の熱貫流率は測定により得られた値 (H=0.0035 kW/m²K) を使用した。包装系の熱容量は, カンキツ類, 空気, ポリエチレンの比熱をそれぞれ 3.7, 1.007, 1.9 (kJ/kgK) とし, それぞれの質量を乗じて合計した値とした。

実験装置と方法

貯蔵庫内にポリエチレンフィルムシートで覆われた試料室を設け, 内部に各試験区の試料を設置した。貯蔵庫内の温度を冷凍機により 7~13 の範囲で変化させ, 2 週間, 試料の質量, 試料室および包装内部の温・湿度およびガス濃度の測定を行った。

実験結果

図 6 に試験区 と における包装内温度の計算値と実測値を示す。実験開始時に試料室と包装内の温度が一致していなかったことに依るものと考えられる差異が認められたが, 20 時間以降は計算値と実測値は良好に一致する結果が得られた。

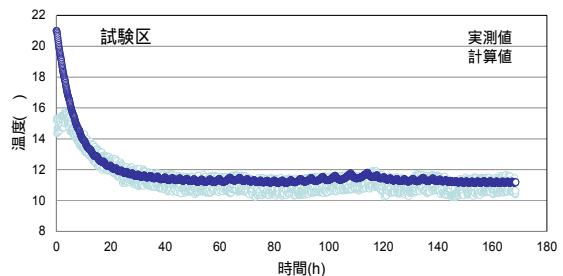
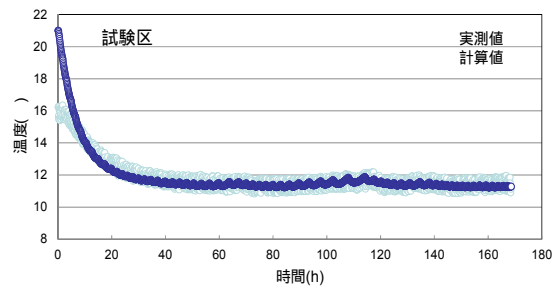


図 6 包装内温度の計算値と実測

図 7 に試験区 と における包装内 O₂ 濃度の計算値と実測値を示す。試験区 では計算値と実測値はほぼ良好に一致したが, 試験区 では, 20 時間以降においても計算値と実

測値の間に1~1.5%の差異が生じた。これは、包装外大気の流動に依るものと考えられた。

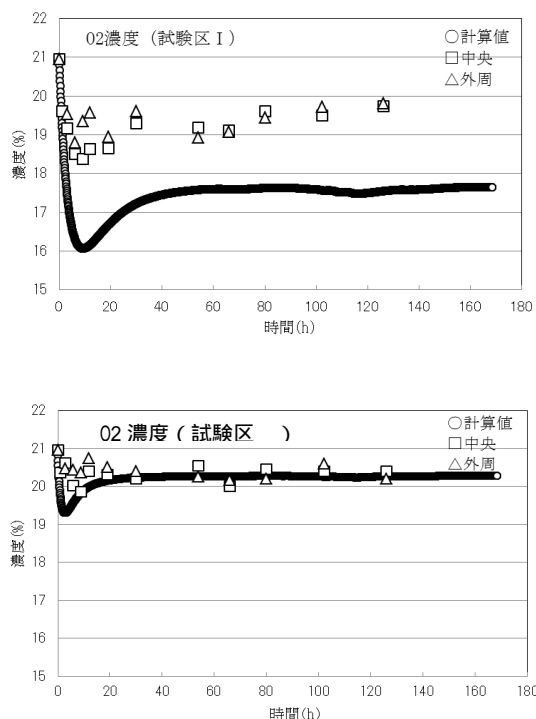


図7 包装内O₂濃度の計算値と実測値

図8に試験区とにおいて比較した包装内相対湿度の計算値と実測値を示す。さかんな蒸散作用により、いずれの試験区においても包装内相対湿度は計算値、実測値とも100%近い値となり、計算値と実測値は概ね良好に一致する結果が得られた。

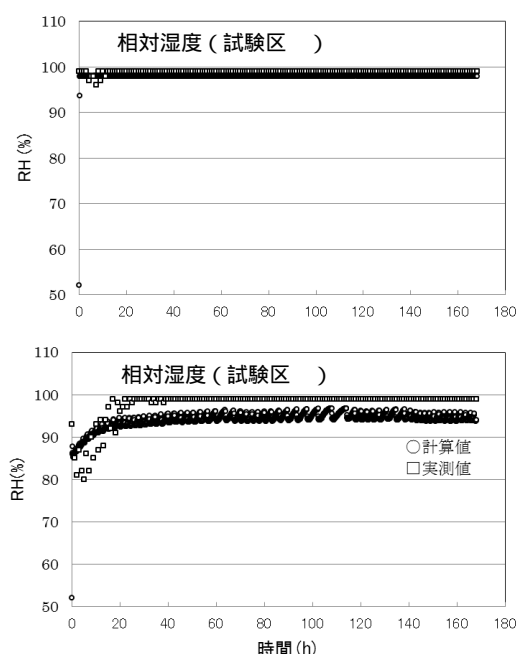


図8 包装内相対湿度の計算値と実測値

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4件)

Rezagah, M.E., Ishida, S., Tanaka, F., Uchino, T., Hamanaka, D., Hikida, Y., Temperature dependency of gas diffusivity and skin resistance of Japanese pear (Oushuu) based on the fruit's true 3D geometry, Food Science and Technology Research, 査読有, 20, 2014, 111-222

疋田慶夫, 西田侑祐, 熱および物質移動を考慮した大容量MAP, 農業食料工学会関西支部報, 査読無, 115, 2014, 53-56

Rezagah, M.E., Ishida, S., Tanaka, F., Uchino, T., Hamanaka, D., Hikida, Y., Determination of gas diffusivity and skin resistance for three cultivars of Japanese pear using their actual 3D geometry, Environmental Control in Biology, 査読有, 51, 2013, 193-200, DOI 10.2525/ecb.51.193

Hikida, Y., Kawano, T., Simulation of gas and water vapor exchange in perforated-film modified atmosphere packaging under dynamic storage conditions, Food Preservation Science, 査読有, 39, 2013, 263-271

〔学会発表〕(計 6件)

疋田慶夫, 西田侑祐, 熱および物質移動を考慮した大容量MAP, 農業食料工学会関西支部, 2013年11月1日, 三重大学

石田沙弥香, Maryam E. Rezagah, 内野敏剛, 田中史彦, 濱中大介, 疋田慶夫, 3次元熱物質移動モデルによるナシの酸素および二酸化炭素ガス拡散係数の予測, 農業環境工学関連学会, 2012年9月13日, 宇都宮大学

河野俊夫, 疋田慶夫, 農業廃棄物を利用した発砲スチロールの脱臭リサイクルに関する研究, 農業環境工学関連学会, 2012年9月13日, 宇都宮大学

河野俊夫, 山本由徳, 疋田慶夫, 食用カナバ粉を用いたパンの品質評価に関する研究, 日本調理科学会, 2012年8月25日, 秋田大学

疋田慶夫, 柴 竜己, 高木 衆, ライム果実の長期低温貯蔵技術の開発, 日本食品保蔵科学会, 2012年6月22日, KKR ホテル大阪

河野俊夫, 藤原郁絵, 疋田慶夫, 村井正之, 極多収性ジャポニカ水稻品種(候補)の米粉を用いた製パンとその品質評価に関する研究, 日本食品保蔵科学会, 2012年6月22日, KKR ホテル大阪

6. 研究組織

(1) 研究代表者

疋田 慶夫 (HIKIDA YOSHIO)

愛媛大学・農学部・教授

研究者番号: 50127908