

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20580276

研究課題名(和文) 流通青果物の品質変化予測システム

研究課題名(英文) Prediction system of quality change in postharvest fresh produce

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

研究成果の概要(和文)：青果物の呼吸作用，蒸散作用，包装資材のガス透過性，流通環境の温湿度データに基づき，包装内ガス濃度および積算呼吸量と積算水分損失量を計算するための数学モデルとシミュレーション・プログラムを作成し，実験により計算結果を検証した。一方，カンキツを対象にして，9種の温・湿度条件下における糖および酸の含有量と果実硬度の変化を測定し，糖および酸含有量と積算CO<sub>2</sub>排出量の関係，相対果実硬度と質量減少率の関係を求め，品質変化予測システムの妥当性を確認した。

研究成果の概要(英文)：A mathematical model and a computer program for predicting gas concentration change in a package, total CO<sub>2</sub> production and weight loss of the fresh produce, based on respiration and transpiration of the produce, gas permeability of the packaging material and temperature and humidity of the marketing atmosphere, were developed. The validity of the system was confirmed by using the relationship between total CO<sub>2</sub> production and sugar or acid content and between weight loss and relative fruit firmness measured under nine sets of temperature and humidity conditions for citrus fruit.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	300,000	90,000	390,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：流通，青果物，品質，予測

## 1. 研究開始当初の背景

本研究では、青果物の①呼吸モデル，②蒸散モデル，③包装資材（プラスチックフィルム，段ボール）のガス透過性，④流通時の温湿度データに基づき，流通中青果物の品質変化を定量的に予測するシステム（コンピュータ・プログラム）の構築を目指す。

収穫後の青果物はその呼吸作用により成分が消耗し鮮度が低下する。この呼吸作用は呼吸環境の温度や大気組成(O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>濃度)に大きく依存し、その依存性は青果物固有のものである。従って、呼吸作用の温度と大気組成への依存性(呼吸モデル)を各種青果物で明らかにすることが必要となるが、この研究は国内外に多く見られる。また、

蒸散作用が青果物の品質に及ぼす影響も大きく、5%の水分損失によって軟化、光沢の消失、しわの出現などが生じ商品としての品質が著しく低下するとされている。この蒸散作用は環境大気の水蒸気圧と青果物表面の水蒸気圧の差に依存するが、両者の関係を記述する蒸散モデルの研究はあまり行われていない。しかし、筆者が‘清見’タンゴールに適用した方法によれば蒸散モデルの測定も可能である。これら呼吸モデルと蒸散モデルについては、測定可能なものという前提に立ち本研究を実施する。

一方、包装資材のガス透過性については多くのデータがあり、これらを活用することができる。また、有孔フィルムにおけるガス透過性については、直径2~15mmの孔に適用できる実験式を得ており、段ボール箱の間隙などにおけるガス透過性については同様な手法で実測することができる。流通時の温湿度データは測定されたものもあるが、想定した流通過程で実測することもできる。

以上の呼吸モデル、蒸散モデル、包装資材のガス透過性、流通時の温湿度データに基づき、流通中における青果物の積算呼吸量と積算水分損失量を計算し、積算呼吸量ならびに積算水分損失量と品質変化との関係を確立することと併せて、品質低下を予測するシステムを開発する計画である。これまでに、包装内の酸素、二酸化炭素、窒素および水蒸気の収支を連立微分方程式で記述し、ルンゲ・クッタ法により一定時間間隔でそれぞれのガスの体積変化および青果物の積算呼吸量と積算水分損失量を計算したので、流通環境の温湿度が一定の条件で、ガス移動を拡散現象と考えた場合のシミュレーション・プログラムはほぼ完成している。従って、本研究ではこれを温湿度が変化する準定常の場合に発展させ、様々な流通条件下における品質変化の予測を図るものである。

## 2. 研究の目的

(1) 現在の拡散・定常計算の数学モデルを基に、環境の温湿度が変化する条件下の拡散・準定常計算のシミュレーション・プログラムを完成させ、計

算結果を実験により検証する。また、ガスの対流現象を数学モデルに導入することを試み、拡散・対流・準定常計算の数学モデルによるプログラムに発展させる。

(2) シミュレーションにより計算される積算呼吸量および積算水分損失量と品質変化との関係を確立する。当面はカンキツ類を対象にして、積算呼吸量と糖および酸含有量との関係、積算水分損失量と果実硬度および果皮障害との関係を明らかにする。

(3) 完成した予測システムを貯蔵や輸送などの流通条件に適用し、品質変化の計測と併せて、システムの妥当性を検証する。

## 3. 研究の方法

(1) 現在の段階で完成している拡散現象に基づく数学モデル(拡散・定常計算モデル)を基に、環境の温湿度が変化する条件下の拡散・準定常計算のシミュレーション・プログラムを完成させる。また、計算の結果を実験により検証する。

シミュレーションにより計算される積算呼吸量および積算水分損失量と品質変化との関係を確立するため、カンキツを対象にして、積算呼吸量と糖および酸含有量との関係、積算水分損失量と果実硬度との関係について実験を行う。

①一定時間間隔で記録された外気の温湿度データをもとに、包装内の酸素、二酸化炭素、窒素、水蒸気の体積変化および積算呼吸量と積算水分損失量を計算する拡散・準定常計算のプログラムを作成する。

②温湿度を変化させた一定規模の室内実験により、プログラムによる計算結果を検証する。ここでは、包装資材内の酸素、二酸化炭素、窒素および水蒸気濃度の変化およびカンキツの水分損失量を測定し、計算結果と比較検討する。

③温度を一定にした保冷库において、デシケータと飽和塩水溶液による温湿度が一定の環境を設定し、カンキツの積算呼吸量と糖および酸含有量との関係、積算水分損失量と果実硬度との関係を測定する。

(2) 現実の流通環境におけるガスの移動は拡散現象のみでは表現できないことが予想されるので、対流現象を数学モデルに導入することを試み、上記のシミュレーション・プログラムを拡散・対流・準定常計算のプログラムに発展させる。

前年度に引き続き、カンキツを対象にして積算呼吸量と糖および酸含有量との関係、積算水分損失量と果実硬度との関係について実験を行い、積算呼吸量と糖および酸含有量との関係、積算水分

損失量と果実硬度との関係を確立する。

①対流現象は包装資材の孔や間隙部に影響するので、これら有孔部の有効ガス透過度を補正する形で数学モデルを変更し、拡散・対流・準定常計算のシミュレーション・プログラムを完成する。

②カンキツの積算呼吸量と糖および酸含有量との関係、積算水分損失量と果実硬度との関係を測定する。これらの測定結果により、積算呼吸量—糖・酸含有量、積算水分損失量—果実硬度の関係を数式で表す。

(3)完成したシミュレーション・プログラムと積算呼吸量—糖・酸含有量、積算水分損失量—果実硬度の関係を利用して、カンキツ生産地における収穫後の品質変化を予測し、品質の測定結果と併せて、システムの妥当性を検証する。また、予測システムを他の青果物に適用するための課題を明らかにし、適用の展望を示す。

#### 4. 研究成果

(1) 拡散・準定常計算の数学モデルおよびシミュレーション・プログラムと計算結果の検証

##### ①ガス移動の数学モデル

青果物を有孔部を含むプラスチックフィルムなどの資材で包装すると、包装内部では青果物の呼吸作用による酸素の吸収と二酸化炭素の排出および蒸散作用による水蒸気の排出がある。フィルム面では、フィルム自体を透過するガスの移動と孔を通しての拡散によるガス移動がある。これらのガス移動を考慮した、有孔および無孔フィルムにおける包装内ガス組成シミュレーションのための数学モデルは次式の連立常微分方程式で表わすことができる。

これらの式は包装内外の各ガスの分圧差に比例して移動が生じることを示しているが、主要なパラメータとして、孔1個当りのガス透過度（有効ガス透過度）、フィルムのガス透過度、 $O_2$  吸収速度、 $CO_2$  排出速度、蒸散速度があり、シミュレーションを行うためには、これらのパラメータを決定する必要がある。

$$\frac{dV_{O_2}(t)}{dt} = A(nD_{O_2} + K_{O_2}) \left( P_{O_2} - P_T \frac{V_{O_2}(t)}{V_{O_2}(t) + V_C(t) + V_N(t) + V_H(t)} \right) - \delta_{O_2} MR_{O_2}$$

$$\frac{dV_C(t)}{dt} = A(nD_C + K_C) \left( P_C - P_T \frac{V_C(t)}{V_{O_2}(t) + V_C(t) + V_N(t) + V_H(t)} \right) + \delta_C MR_{CO_2}$$

$$\frac{dV_N(t)}{dt} = A(nD_N + K_N) \left( P_N - P_T \frac{V_N(t)}{V_{O_2}(t) + V_C(t) + V_N(t) + V_H(t)} \right)$$

$$\frac{dV_H(t)}{dt} = A(nD_H + K_H) \left( P_H - P_T \frac{V_H(t)}{V_{O_2}(t) + V_C(t) + V_N(t) + V_H(t)} \right) + \delta_H MT_{H_2O}$$

$V_{O_2}(t), V_C(t), V_N(t), V_H(t)$	: 包装内 $O_2, CO_2, N_2, H_2O$ の体積 ( $10^{-6} m^3$ )
$A$	: フィルムの表面積 ( $m^2$ )
$n$	: 単位表面積当り孔の個数 (個/ $m^2$ )
$D_{O_2}, D_C, D_N, D_H$	: 孔1個当り $O_2, CO_2, N_2, H_2O$ の有効ガス透過度 ( $10^{-6} m^3 / h \cdot kPa$ )
$K_{O_2}, K_C, K_N, K_H$	: フィルムの $O_2, CO_2, N_2, H_2O$ の透過度 ( $10^{-6} m^3 / m^2 \cdot h \cdot kPa$ )
$P_{O_2}, P_C, P_N, P_H$	: 外気の $O_2, CO_2, N_2, H_2O$ の分圧 (kPa)
$P_T$	: 包装内の全圧 (kPa)
$\delta_{O_2}, \delta_C, \delta_H$	: $O_2, CO_2, H_2O$ の比体積 ( $m^3 / kg$ )
$M$	: 青果物の質量 (kg)
$R_{O_2}, R_{CO_2}$	: $O_2$ 吸収速度と $CO_2$ 排出速度 ( $10^{-6} kg / kg \cdot h$ )
$T_{H_2O}$	: 蒸散速度 ( $10^{-6} kg / kg \cdot h$ )
$t$	: 時間 (h)

##### ②シミュレーション・プログラム

シミュレーションでは、環境大気の温・湿度が変動する場合の準定常計算を行うため、1分間隔の計測された温・湿度データを利用して、1秒ステップのルンゲ・クッタ法による数値計算を行うことにした。シミュレーション・プログラムの概要を図1に示す。

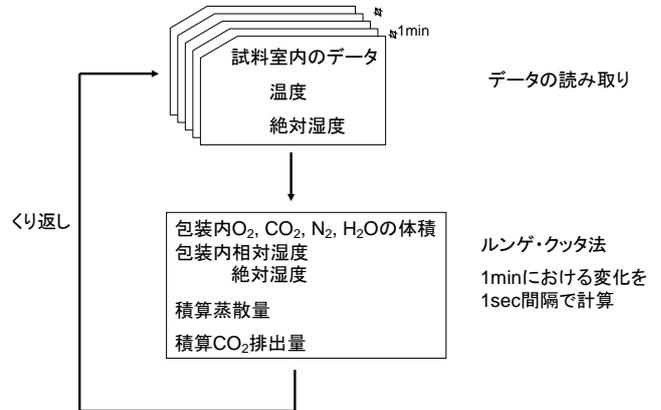


図1 シミュレーション・プログラムの概要

##### ③計算結果の検証

計算結果を検証するための実験には、清見タンゴールを供試した。内面寸法 $2.4 \times 1.7 \times 1.0m$ のプレハブ貯蔵庫の内部にポリエチレンシートで被覆した試料室を作成し、約1kgの清見を厚さ0.1mmのポリエチレンフィルムで包装して収納した。試験区は、ポリエチレンフィルム面に直径5mmの孔を2個～100個（片側個数）あけた試験区5種類と無包装の対照区とし、冬季から春期の環境大気温度を想定して、プレハブ貯蔵庫の温度を7～13°Cの幅で変動させながら、2週間の実験を行った。測定の項目は、試料室内の温・湿度（0.3mmT 熱電対5箇所、高精度デジタル温湿度計4箇所、1分間隔）および $O_2$ と $CO_2$ 濃度（2箇所）、包装内の温・湿度（0.3mmT 熱電対2箇所、携帯型温湿

度計1箇所、1分と5分間隔) およびO<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>濃度(2箇所)とした。O<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>濃度の測定は、内径1mmのポリエチレンチューブを通して貯蔵庫の外部から1mL容のガスタイトシリンジでガスを採取し、ガスクロマトグラフ(TCD)で分析した。また、蒸散作用による質量変化を求めるため、実験開始時と終了時の清見固体の質量を電子天秤(0.1g)で測定した。

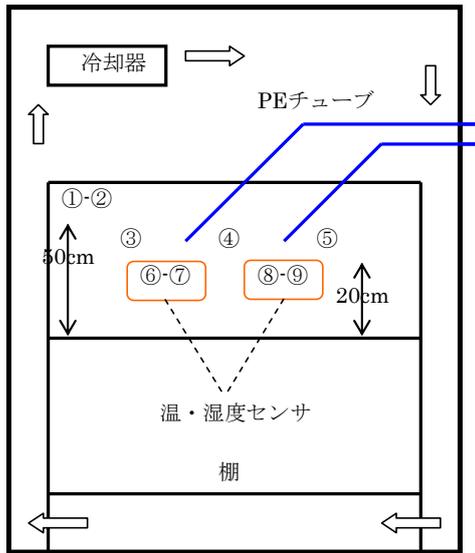


図2 実験装置の概略図

シミュレーションにおける孔の有効ガス透過度は、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oとも下記の実験式に依った。また、包装フィルムは厚さ0.1mmであるため、フィルムのガス透過度は0とした。

$$D_i = 2.98 \times 10^{-2} d^2 + 5.37 \times 10^{-1} d + 8.22 \times 10^{-1} \quad (10^{-6} m^3 / hkPa)$$

$d$ : 直径(mm)

清見の呼吸モデルは

$$R_{CO_2} = 5.4969 \times 10^{16} \exp(-10297 \frac{1}{T}) \quad (10^{-6} kg / kgh)$$

$T$ : 温度(K)

$$R_{O_2} = 1.3732 \times 10^{17} \exp(-10629 \frac{1}{T}) \quad (10^{-6} kg / kgh)$$

$T$ : 温度(K)

を、蒸散モデルは

$$T_{H_2O} = 202.8V_d + 16.27 \quad (10^{-6} kg / kgh)$$

$V_d$ : 水蒸気圧差(Pa)

を利用した。これらの有効ガス透過度の実験式、呼吸モデル、蒸散モデルはこれまでの研究で得られたものである。

試験区I(直径5mmの孔、片側2個)における包装内CO<sub>2</sub>濃度の計算値と実測値の比較を図3に示す。実験開始後10時間程度は計算値と実測値は良好に一致したが、40時間程経過して包装内の温度が安定した段階では、計算値の方が2%程度大きい結果となった。O<sub>2</sub>濃度の変化は、CO<sub>2</sub>とは逆で、時間経過により減少したが、40時間程経過した段階から、計算値の方が2%程小さい結果となった。これらの主要な原因は、ガス移動において拡散現象のみを仮定したことによるものと考えられる。試験区V(直径5mmの孔、片側100個)ではCO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>ともほぼ大気レベルの値となり、計算値と実測値は良好に一致した。

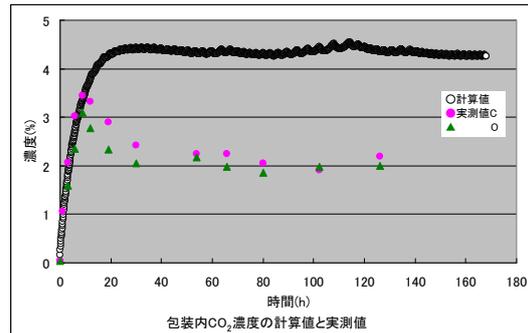


図3 包装内CO<sub>2</sub>濃度の計算値と実測値

試験区Iにおける包装内相対湿度の計算値と実測値の比較を図4に示す。包装内の相対湿度は実験開始時からほぼ100%に達し、計算値と実測値は良好に一致する結果が得られた。試験区Vでは、実験期間中の平均値が計算値では94.2%、実測値では98.4%となり、計算値の方が4%程低い結果となったが、温湿度計の測定誤差を考慮すると大きな差にはならないものと考えられる。

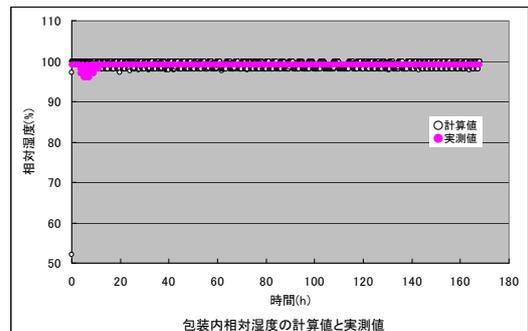


図4 包装内相対湿度の計算値と実測値

果実からの水分損失が主要な原因と考えられる質量減少率では、有孔数が多くなる程、計算値と実測値は近づく傾向が見られたが、計算値が実測値よりも小さい結果となった。これは、水蒸気の移動において拡散現象のみを仮定したことによるものと考えられる。

以上の結果より、作成したシミュレーション・プログラムによる計算結果はほぼ満足できることが検証されたが、さらに計算精度を向上させるための課題として、環境大気の流動を加味することが考えられ、計算結果と実測値を利用した最小二

乗法により有効ガス透過度を調整することにした。

## (2) 積算呼吸量、積算水分損失量と品質変化

青果物の呼吸モデルと蒸散モデル、包装資材のガス透過性、および流通時の温湿度データに基づいて、流通過程における積算呼吸量と積算水分損失量を計算することができる。従って、積算呼吸量ならびに積算水分損失量と含有成分や果実硬度との関係を確立することができれば、流通過程における青果物の品質変化を予測することができる。ここでは、3種類のカンキツを対象にして、9種の温・湿度条件下における糖および酸の含有量と果実硬度の変化を4週間にわたり測定した。

### ①実験方法

2008年12月収穫のウンシュウミカン(久能, Lサイズ), 2009年3月収穫のタンゴール‘清見’(Lサイズ), 2010年1月収穫のイヨカン(宮内, Lサイズ)を実験に使用した。いずれも、収穫直後の果実である。温度5, 10, 20°C下におけるデシケーターの内部に、それぞれLiCl, NaBr, KNO<sub>3</sub>の飽和塩水溶液による低, 中, 高湿度の試験区を設け試料を貯蔵した。なお、デシケーターの内部は毎日換気した。

果皮を除いた果肉1個体からハンドジュースで果汁を採取し、遠心分離(3500rpm, 30min)した上澄み液を21倍に希釈して、0.45μmメンブレンフィルターでろ過した後、糖(スクロース, グルコース, フラクトース)の分析には5μlを、酸(クエン酸)の分析には10μlを高速液体クロマトグラフに注入して測定した。測定は2週間隔で実施し、含有量を果汁中質量濃度(%)で表示した。

荷重・変位計測装置により、果実赤道部3箇所における圧縮試験を3日間隔で継続した。圧縮試験におけるプランジャは、ウンシュウミカンでは直径5mmの円柱形、清見とイヨカンでは直径10mmの球形のものを使用し、移動速度25mm/minにおける荷重と変位を記録した。ウンシュウミカンでは1N、清見とイヨカンでは3Nの荷重における変位から、荷重/変位=果実硬度(N/mm)とした。

果実の質量変化を3日間隔で、果実体積の測定を2週間隔で行った。

果実からの積算CO<sub>2</sub>排出量を求めるために、Lおよび2Lサイズの試料を利用して、密閉法によるO<sub>2</sub>吸収速度とCO<sub>2</sub>排出速度の測定を温度5, 10, 20°Cで実施し、Arrhenius型の呼吸モデルを作成した。

### ②実験結果

いずれの糖も貯蔵期間中に減少する傾向が認められた。クエン酸の減少傾向は糖よりも顕著で、カンキツにおける主要な呼吸基質であることが推察された。蒸散作用のみによる水分損失率を利用して含有量の濃度補正を行い、積算CO<sub>2</sub>排出量との関係を検討した結果、糖の合計値(スクロース, グルコース, フラクトースを合わせた濃度)およびクエン酸とも概ね一次関数で近似することができた。しかし、清見における糖合計値は増加した後減少する傾向が認められ、二次関数で近似した。得られた結果の例を図5(ウンシュウミカン, 糖合計値)と図6(清見, クエン酸)に示す。これらの結果より、収穫後の積算CO<sub>2</sub>排出量の計算結果から含有成分の変化を予測することができる。

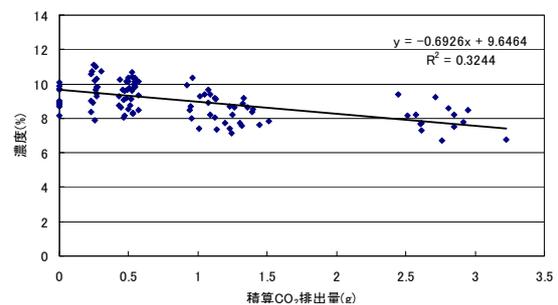


図5 糖合計値の変化(ウンシュウミカン)

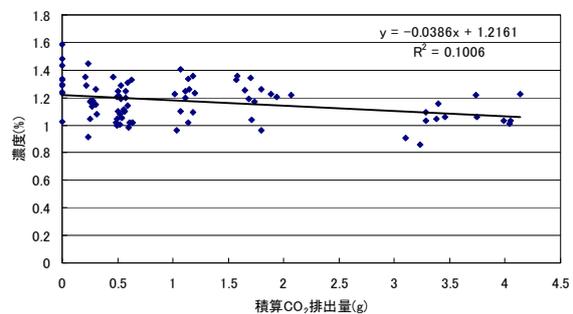


図6 クエン酸の変化(清見)

果実硬度においては、個体差を除去するために初期果実硬度に対する相対果実硬度を求めた。貯蔵期間の経過に伴い、相対果実硬度は減少した。

相対果実硬度の変化には温度の影響は認めにくく、湿度条件が強く影響するものと考えられ、蒸散作用が主要な要因である質量減少率で統一的に表現することができた。図7に清見の例を示すが、相対果実硬度と質量減少率には指数関数による良好な関係が認められ、これより、収穫後の質量減少率の計算値から果実硬度の変化を予測することができる。

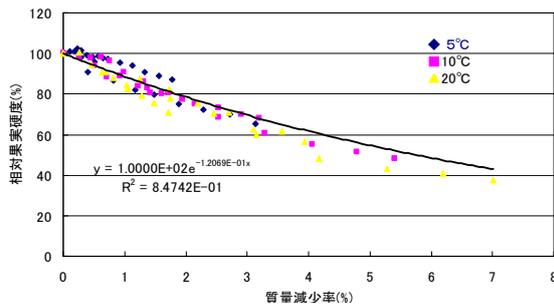


図7 相対果実硬度と質量減少率 (清見)

(3) 品質変化予測システムによる果実硬度、糖および酸含有量変化の予測

清見の生産地における貯蔵条件を目安に実施した、段ボール箱による10°Cで4週間の貯蔵実験の結果に予測システムを適用し、果実硬度計による硬度、ブリックス糖度計による糖度、クエン酸換算の滴定酸度の変化を予測した。

実験の結果、果実硬度は8%程度、滴定酸度は21%程度減少したが、糖度の有意な減少は認められなかった。シミュレーション・プログラムによる質量減少率と積算CO<sub>2</sub>排出量の計算値により予測した値は、これらの品質変化とほぼ適合する結果が得られた。

以上のように、シミュレーションにおいて青果物の蒸散作用に伴う水蒸気の移動を考慮したこと、包装資材の有孔部におけるガス移動を計算に取り入れたこと、流通環境の温湿度が変化する条件に拡張できたこと、また、カンキツにおいて積算CO<sub>2</sub>排出量および質量減少率と品質変化との関係を確立できたことは本研究の特色で、他に例を見ない。今後は、他の青果物においても積算呼吸量・積算水分損失量と品質変化との関係を構築することが課題であるが、本研究による結果は、品質予測に基づいた新たな農産物流通技術の進展に有益な知見を提供するものである。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

- ①TECHAVISES Nutakorn, HIKIDA Yoshio, KAWANO Toshio, A Comparative Study of the Effect of Postharvest Treatments on Occurrence of Kohansho and Quality of 'Kiyomi' Tangor, Food Preservation Science, 査読有, 2011, 印刷中
- ②TECHAVISES Nutakorn, HIKIDA Yoshio, Effect of MA Conditions on Occurrence of Kohansho and Quality of 'Kiyomi' Tangor, Food Preservation Science, 査読有, 34(4), 2008, 197-202

〔学会発表〕(計4件)

- ①疋田慶夫, 流過程におけるカンキツの含有成分と果実硬度の変化, 農業機械学会, 2010年9月15日, 愛媛大学
- ②疋田慶夫, カンキツ果実の組織内ガス移動におけるレジスタンス, 農業機械学会, 2010年9月15日, 愛媛大学
- ③疋田慶夫, 流過程における青果物の品質変化—カンキツの果実硬度と含有成分の変化—, 日本食品保蔵科学会, 2009年6月20日, 東京聖栄大学
- ④疋田慶夫, 動的貯蔵環境下における有孔フィルムMA包装内のガスおよび水蒸気組成のシミュレーション, 日本食品保蔵科学会, 2008年6月21日, 島根大学

## 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