

平成22年 5月24日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19380144

研究課題名（和文） 安全で高品質な青果物流通システムの構築

研究課題名（英文） Development of distribution system for managing safety and high quality of fresh fruit and vegetables

研究代表者

内野 敏剛（UCHINO TOSHITAKA）

九州大学・大学院農学研究院・教授

研究者番号：70134393

研究成果の概要（和文）：安全で高品質な青果物の新しい流通システムを構築することを目的として(1)青果物表在微生物の赤外線、紫外線殺菌、(2)流通環境下の青果物品質予測、(3)流通環境下の微生物増殖挙動予測、(4)低温輸送車荷室内の青果物温度変化予測を行い、紫外線照射時の予熱温度により殺菌効果に差があること、構築した青果物品質予測モデル、微生物増殖予測モデルにより、品質と微生物の増殖の予測が可能であること、CFDにより冷凍車に積み付けたナス果実の品温の予測がある程度可能であること等を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：To develop a new distribution system for managing safety and high quality of fresh produces, following researches were conducted: (1) inactivation of microbe irradiated by IR and UV; (2) prediction of quality of fresh fruit and vegetables during distribution; (3) development of prediction model for microbial growth during distribution; (4) CFD prediction of the temperature distribution within a refrigerated truck filled with fresh produces during transport. As a result, following findings were obtained: surface temperature of plate medium inoculated with spore suspension affected survival rate of microbe at UV was irradiated onto the surface; a developed mathematical model successfully predicted change in L-AsA and total sugar content in garland chrysanthemum; microbial growth curve predicted by modified Gompertz model agreed with experimental value; it might be possible to make predictions of eggplant fruit temperature loaded onto a refrigerated truck to some extent by means of CFD.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

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：(1)青果物流通、(2)温度変化、(3)アスコルビン酸含量、(4)CFD、(5)温度予測、(6)冷凍車、(7)シミュレーション、(8)微生物

## 1. 研究開始当初の背景

1965年のコールドチェーン勧告以来40年以上が過ぎ、我が国における低温流通は完成された印象が強い。しかしながら、予冷後荷積みまでの間に常温に放置される、あるいは積載容量限界まで荷積みを行う等、以前から指摘されていた問題点が解決されておらず、青果物の品温は流通過程の中で適正に保たれているとは言い難い。これはすなわち、農産物の品質劣化、微生物増殖につながり、実際に、収穫から消費までの間に廃棄される青果物は、欧米では12~13%であるのに対し、我が国では28~33%と出荷量の1/3程度に上るのが実情である。また、アマナツなどの晩柑類は、熊本県ではミドリカビ病等で生産量の20%が貯蔵中に腐敗している。一方、近年、農産物・食品の微生物やプリオンによる汚染の問題から、これらに対する消費者の関心は高く、より安全で高品質の品物を求めようとする傾向が強まっている。このため、事業者はHACCP、ISO22000、SQF、GAP、GMP等の認証制度を積極的に導入し、安全性の向上を図ろうとしているが、上述のように青果物流通過程では温度管理さえ十分でない。これらはコールドチェーンの管理がひとつのリングごとに単発的に行われており、生産から流通、消費に至る全体がシステム化されていないこと、また、コールドチェーンは温度管理システムとの認識が強く、微生物管理の視点がないことに原因があると言える。

これらの問題を解決するためには、流通過程における品質と微生物挙動の予測を行い、リスク評価と温度・微生物管理を行える新システム、すなわち、安全で高品質な青果物を歩留まり良く供給するため、温度管理、微生物管理等をシステムティックに行える新しい流通システムを構築する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究の最終目的は、低コストで安全と高品質を保証する青果物の新しい流通システムを構築することである。そのため本研究では(1)青果物に表在する微生物を赤外線、紫外線を用いた物理的方法により殺菌し、カビ・腐敗を低減させる、(2)変動する環境下で流通する青果物品質を予測する、(3)同環境下で微生物の増殖挙動の予測を行う、(4)低温輸送車両内の温度変化の予測を行うことにより、安全で高品質な流通システムの基礎固めを試みたものである。

## 3. 研究の方法

(1)紫外線殺菌の効果に及ぼす処理条件の影響

響

赤外線(IR)による加熱は熱媒体を必要とせず、菌体への直接加熱により短時間での殺菌処理が可能であり、また、紫外線(UV)と併用することでそれぞれを単独で用いた場合よりも死滅効果が高められることが、これまでに明らかになっている。ここでは*Bacillus subtilis* NBRC3134 (*B. subtilis*) に対してUV照射を行い、処理温度がUVの死滅効果に及ぼす影響について検討するとともに、加熱方法の違いによる死滅効果への影響について確認を行った。

常法により*B.subtilis* 孢子懸濁液を作成後、0.1 mlをNA培地に塗布して照射サンプルを作成した。上部に、長さ220 mm、波長253.7 nmの紫外線ランプを備えた照射装置内の照射距離150 mmの位置に照射サンプルを設置後、サンプルを予め赤外線ランプまたはホットプレートで加熱して、培地表面温度を20℃、30℃、40℃、50℃とし、最大60秒間の紫外線照射を行った。照射処理後の照射サンプルを30℃で48時間培養し、出現したコロニー数を計測して生菌数を算出した。

### (2)変動温度下での青果物の品質予測

流通環境における青果物の積算呼吸量とアスコルビン酸(AsA)含有量および糖含有量の変化特性を把握するとともに、それらの関係を明らかにし、既存の温度・時間依存性呼吸速度予測モデルと1次反応速度論を併用することで流通環境における青果物内容成分含有量変化を予測する数理モデルの構築を行った。

実験には、シュンギク(*Chrysanthemum coronarium*) ‘博多改良中葉’を供試し、呼吸速度測定ならびに内容成分含有量の測定を行った。温度環境として、収穫直後から小売店ショーケースへの陳列までの温度変化の調査値をインキュベータ内で再現させた流通温度再現区(温度条件1)、これに加え、小売店ショーケース以外の流通経路においては、気温が流通温度再現区よりも5℃高いものと仮定した仮想流通温度区(温度条件2)を設けた。

温度条件1、2の下で通気式呼吸測定法によってシュンギク150gの呼吸速度の経時変化を0.5 h毎に測定した。また、計測対象とした内容成分は全糖(グルコース、フルクトース、スクロース含有量の総和)およびL-AsAで、モデルパラメータ決定のためには、実験開始後0、5、12、23、27、51、71 h経過時に、モデル検証のためには、実験開始後0、23、27、51、71 h経過時に、試料5個体の内容成分の測定を行った。

(3) 水分活性を考慮した微生物の増殖挙動予測モデル

これまで Gompertz モデルパラメータの最大増殖速度  $R_G$  および誘導期  $t_L$  の予測を構築し、温度変動下における *B. cereus* の予測を行ってきたが、このモデルは青果物表在微生物の増殖挙動を十分に表現できないため、温度変動に加え、新たに水分活性 ( $a_w$ ) をパラメータとしてもつ増殖挙動予測モデルを構築し、その有効性を検証した。

*Bacillus cereus* NBRC13494 (*B. cereus*) の懸濁液を作成し、水分活性  $a_w$  を 0.984~0.999 に調整した NB 培地に 1 ml 植菌した。種々の温度条件下で培養後定期的にサンプルを取り出し、平板培養法で菌数を測定した。また、半径 2 cm の円形にカットしたレタス葉 10 g を供試し、 $4.64 \times 10^4$  cfu/ml の *B. cereus* を含む 0.1 % ペプトン水 1 l に浸漬して植菌後、ストマッキングし、NGKG 寒天培地で培養して生菌数を測定した。これらの測定データは構築したモデルのパラメータの同定、及び、モデルの検証に用いた。

(4) 低温輸送車両内の温度変化の予測

熱流体解析ソフトウェア ANSYS CFX を用い、ナス果実の段ボール箱を満載した冷凍車荷室内の解析を行い、荷室内空気とナス果実の変化予測を試みた。箱詰めしたナス果実は一様な個体と仮定し、密度、比熱、熱伝導率等を測定、あるいは一元差分法で求めた。また、ナス果実は呼吸することから、温度と時間経過を考慮した呼吸速度モデルにより算出した呼吸速度から呼吸熱を得、これを体積発熱量として CFD(数値流体力学)の解析に用いた。外部からの熱の侵入は外気温と荷室内壁面温度との差に壁面の熱貫流率を乗じて求め、外気温は測定値の日変動を三角関数で表し、計算に用いた。

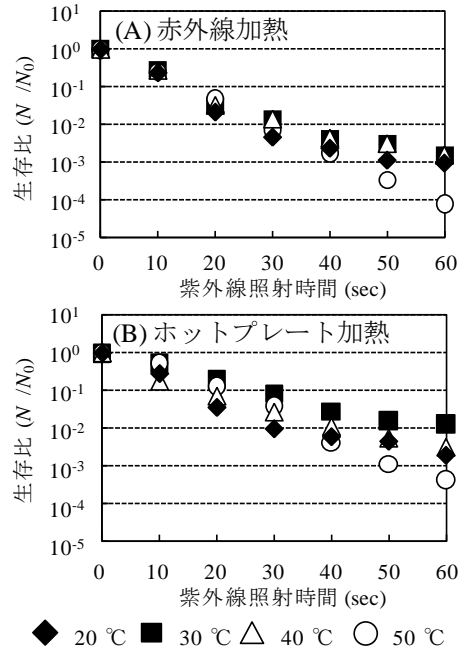
計算格子数は積載物領域を 161,339、空気領域を 83,814 とし、計算格子総数は 246,559 とした。また、計算時間間隔は 1 min、解析時間は 24 h とした。

4. 研究成果

(1) 赤外線・紫外線殺菌の効果に及ぼす処理条件の影響

図 1 に、各処理温度における *B. subtilis* の生存比変化を示す。*B. subtilis* では処理温度 20 °C、40 °C において同程度の生存比変化が見られ、50 °C では 20 °C の場合と比較して最大 1 オーダー程度の死滅効果の向上が確認された。また、処理温度 30 °C において、赤外線加熱、ホットプレート加熱ともに最も菌が死滅しにくい傾向が確認された。詳細なメカニズムの解明には様々な検討を要するが、30 °C は今回供試した *B. subtilis* の増殖至適温度であることから、紫外線の菌死滅効果に何らかの影響を及ぼした可能性が考えられる。以上の結

果から、紫外線殺菌の死滅効果は僅かながら処理温度の影響を受けると考えられた。また、*B. subtilis* では、ホットプレート加熱に比べ、赤外線加熱の方が 1 オーダー程度死滅効果が高くなる傾向がみられた。これは、放射と伝導の伝熱法の差によるものと思われるが、明確でない。



◆ 20 °C ■ 30 °C △ 40 °C ○ 50 °C  
 図 1 各処理温度における *B. subtilis* の生存比変化、(A) 赤外線加熱、(B) ホットプレート加熱

(2) 変動温度下での青果物の品質予測

文献にみられる変温環境下における呼吸速度予測式、及び L-AsA、全糖の相対含有量予測式から、以下の内容成分の相対含有量予測モデルを導いた。

$$\frac{A_t}{A_0} = \exp \left( \beta_A \int_0^t \left[ K_1 \exp \left( \frac{-E_a}{RT} \right) \{ 1 + K_2 \exp(-k_d t) \} \right] dt \right) \quad (1)$$

$$\frac{S_t}{S_0} = \exp \left( \beta_S \int_0^t \left[ K_1 \exp \left( \frac{-E_a}{RT} \right) \{ 1 + K_2 \exp(-k_d t) \} \right] dt \right) \quad (2)$$

ここに、 $A_t$  および  $S_t$  は実験開始からの経過時間  $t$  における L-AsA および全糖含有量、 $A_0$  および  $S_0$  は実験開始時の L-AsA および全糖含有量の平均値、 $K_1$ 、 $K_2$  は酵素の合成・分解に関するパラメータを合成したもの、 $E_a$  は活性化エネルギー、 $R$  は気体定数、 $T[K]$  は絶対温度、 $k_d [h^{-1}]$  は分解速度定数、 $\beta_A$ 、 $\beta_S$  はそれぞれ、L-AsA 相対含有量及び全糖相対含有量と呼吸速度とを関連付けるパラメータである。

温度条件 1 の下で行った呼吸速度測定、内容成分含量測定により、(1)、(2) 式のパラメータを非線形最小二乗法で求めた。その後、温度条件 1、2 により得られた内容成分の相対含有量を(1)、(2)式で予測した結果、図 2 に示

すように予測値と実測値は概ね一致した。流通温度再現区（温度条件 1）における L-AsA および全糖含有量の実測値と予測値との差から算出される RMSE は、それぞれ 0.028 および 0.081 であり、仮想流通温度区（温度条件 2）における L-AsA および全糖含有量の RMSE はそれぞれ 0.038 および 0.092 であった。いずれの温度区、成分においてもシュンギク的全糖ならびに L-AsA の相対含有量は実用上問題ない程度の精度で予測可能であることが示された。

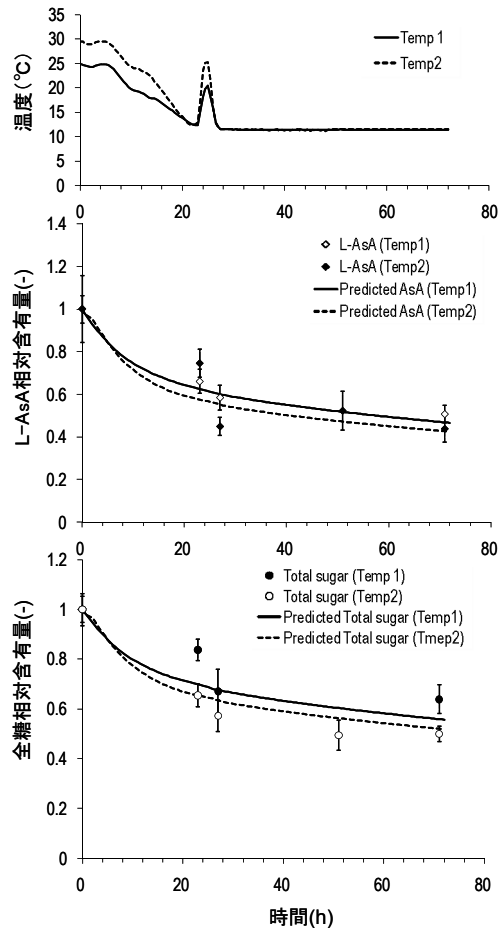


図 2 流通温度再現区（温度条件 1）、仮想流通温度区（温度条件 2）における L-アスコルビン酸、全糖の相対含有量の経時変化、縦棒は標準誤差を示す

(3) 水分活性を考慮した微生物の増殖挙動予測モデル

予測モデルとして Gompertz モデルを、最大増殖速度  $R_G$ 、誘導期  $t_L$  および最大菌数の対数値  $N_{max}$  をパラメータとして修正した(3)式で示す修正 Gompertz モデルを用いた。

$$\log N = A + (N_{max} - A) \exp \left\{ - \exp \left[ - \frac{R_G e}{N_{max} - A} (t_L - t) + 1 \right] \right\} \quad (3)$$

ここに、 $N$  は生菌数、 $A$  は初菌数の対数値、 $t$  は時間を示す。

(3) 式のパラメータ  $R_G$ 、 $t_L$ 、について温度依存性および、 $a_w$  依存性を以下の (4) ~ (9) 式で表し、異なる  $a_w$  下で温度が変動するときの微生物増殖挙動を予測した。

$$R_G = f(t) \cdot g(a_w) / g(0.999) \quad (4)$$

$$f(t) = A_{R_G} \exp(B_{R_G} / T) \quad (5)$$

$$g(a_w) = p(1 - a_w)^q \exp^{r(1 - a_w)} \quad (6)$$

$$t_L = h(t) \cdot k(a_w) / k(0.999) \quad (7)$$

$$h(t) = [A_L \exp(B_L / T)]^{-1} \quad (8)$$

$$k(a_w) = l / (m + a_w^n) \quad (9)$$

ここに、 $A$ 、 $B$  は、それぞれ Arrhenius 式の頻度因子と活性化エネルギー、添字  $R$ 、 $L$  は最大増殖速度と誘導期を、 $p$ 、 $q$ 、 $r$ 、 $l$ 、 $m$ 、 $n$  はパラメータを示す。

微生物は環境条件が同一であっても増殖挙動は様ではないため、予測には誤差が発生する可能性が極めて高い。また、予め誤差範囲を把握できていれば、実用の際有効である。ここでは、Monte Carlo 法を用いて Gompertz モデルパラメータ  $A$ 、 $R_G$ 、 $t_L$ 、 $N_{max}$  の誤差範囲を決定した。

図 3 に温度 30 °C でレタス表面 ( $a_w=0.995$ ) 上で培養した *B. cereus* の増殖挙動と本モデルを用いた予測値を示す。本モデルによる予測は誘導期を正確に予測できるが、最大増殖速度を実際より大きく予測した。培地上での同様の試験では、実験値は予測値の 68% 信頼区間内にはほぼ取り精度の高い予測が可能であったことから、本モデルは、青果物表在微生物の増殖予測に用いるためには、温度、水分活性に加え、青果物の持つ微生物阻害要因を考慮する必要があると思われる。

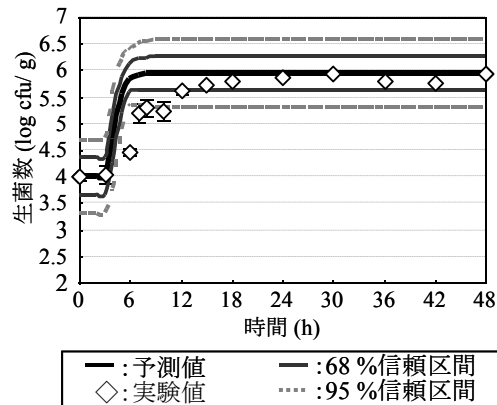


図 3 30°C、レタス表面 ( $a_w=0.995$ ) での *B. cereus* の増殖挙動

(4) 低温輸送車両内の温度変化の予測

図 4 に CFD により得られた冷却 24 h 後の荷室天井面および側壁面の可視化した空気温度分布を示す。荷室内の空気は吹出口空気によって荷室前方から後方に向かって冷却され、荷室下方および荷室後方では空気が循

環せず高温となった。これは実測値の傾向ともよく一致した。

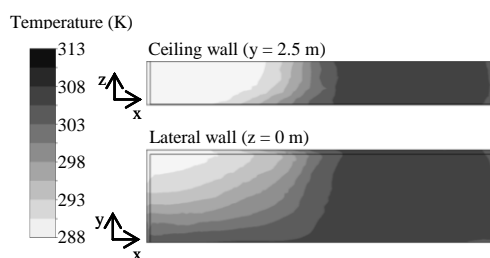


図4 冷凍車荷室内の温度分布

図5に荷室中央 ( $z = 1.175$  m) の高さ1.08 m、前方から3.1、5.9、9.1 mの位置の積載物温度実測値と計算値の比較を示す。積載物温度の実測値は経時的に上昇する傾向を示し、計算値もナスの呼吸熱を考慮したことでこの傾向を表現することができた。計算値は、 $x = 9.1$  mで実測値と良く一致したが、 $x = 3.1$  m、5.9 mでは実測値を上回る結果となった。この原因としては、実測では、吹出口から出た冷気が積載段ボール箱のすき間を通り、手掛け穴を介して侵入したために、より早く冷却されたが、計算では箱内への空気の流入を考慮していないためと考えられる。

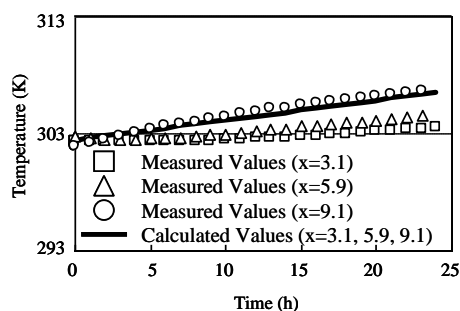


図5 冷凍車に積載したナス果実温度の実測値と計算値の比較

## 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5件)

① D. Hamanaka, A. Niihara, K. Morimatsu, G.G. Atungulu, F. Tanaka, T. Uchino, Effect of fluctuating temperature on adhesion of bacteria related to fresh produce, *Acta Horticulturae*, 837, 2008, 205-210.

② 小西慶浩、田中史彦、内野敏剛、濱中大介、CFDを用いた低温輸送時の青果物および冷凍車荷室内の温度予測、日本冷凍空調学会論文集、26(2)、2009、159-165.

③ 安永円理子、内野敏剛、吉田敏、筑紫二郎、田中史彦、流通環境におけるシュンギクの呼吸速度の予測、植物環境工学、2009、21(4)、143-148.

④ 安永円理子、内野敏剛、吉田敏、田中史彦、筑紫二郎、流通環境におけるシュンギクの内容成分含量変化予測モデルの構築、植物環境工学、21(4)、2009、154-161.

⑤ D. Hamanaka, G.G. Atungulu, F. Tanaka, T. Uchino, Effect of combining infrared heating with ultraviolet irradiation on inactivation of mold spores, *Food Science and Technology Research*, 16(4), 2010, in press.

[学会発表] (計17件)

① T. Uchino, F. Tanaka, D. Hamanaka, N. Seike, Mathematical model for microbial growth under a fluctuating temperature, International Workshop on Agricultural and Bio-systems Engineering (IWABE), Nong Lam Univ., Hochiminh City, Vietnam, 2007.

② E. Yasunaga, S. Yoshida, T. Uchino, G. Furue, Respiratory characteristics and changes in quality of garland chrysanthemum (*Chrysanthemum coronarium*) during simulated distribution conditions, Quality Management of Fresh Cut Produce APEC Symposium in Thailand Bangkok, 2007.

③ 伊藤大輔、岩下博美、内野敏剛、青果物流通中の品質変化とその予測に関する一考察、環境工学関連5学会合同大会、東京農工大学、2007.

④ 井上亜由美、茶谷基行、内野敏剛、CFDを利用した青果物貯蔵庫内の温度変化解析、環境工学関連5学会合同大会、東京農工大学、2007.

⑤ 清家暢隆、濱中大介、田中史彦、内野敏剛、変動する温度条件下における微生物の動的挙動予測、農業機械学会九州支部会例会、鹿児島大学、2007.

⑥ 小西慶浩、井上亜由美、田中史彦、内野敏剛、濱中大介、CFDを用いた低温輸送時の青果物および冷凍車荷室の温度予測、2008年度日本冷凍空調学会、大阪市立大学、2008.

⑦ 古江元気、安永円理子、花田祐介、濱中大介、田中史彦、内野敏剛、温度、ガス濃度の変動が青果物の呼吸速度および内部成分の変動に及ぼす影響の予測、日本生物環境工学会、愛媛大学、2008.

⑧ 山田浩徳、濱中大介、田中史彦、内野敏剛、赤外線および紫外線が細菌胞子の不活化に及ぼす影響、農業機械学会九州支部会例会、熊本県立大学、2008.

⑨ 小西慶浩、田中史彦、内野敏剛、濱中大介、CFDを利用した貯蔵施設内の温度変化解析、農業機械学会九州支部会例会、熊本県立大学、2008.

⑩ 清家暢隆、山名志郎、濱中大介、田中史彦、内野敏剛、複数の環境要因を考慮した微生物の増殖挙動予測モデルの開発、農業機械学会

九州支部例会、熊本県立大学、2008.

⑪ D. Hamanaka, A. Niihara, K. Morimatsu, G.G. Atungulu, F. Tanaka, T. Uchino, Effect of fluctuating temperature on adhesion of bacteria related to fresh produce, Asia-Pacific Symposium on Assuring Quality and Safety of Agri-Food (APS2008), Bangkok, Thailand, 2008.

⑫ T. Uchino, D. Itoh, F. Tanaka, D. Hamanaka, Development of prediction model for sugar content of fresh shredded cabbage, The 4th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agricultural and Biosystems Engineering (ISMAB 2008), Taichung, Taiwan, 2008.

⑬ 濱中 大介、山田 浩徳、田中 史彦、内野 敏剛、食品・農産物腐敗原因微生物に対する紫外線・紫外線の併用殺菌処理、農業機械学会第67回年次大会、宮崎、2009.

⑭ 花田 祐介、安永 円理子、古江 元気、内野 敏剛、田中 史彦、筑紫 二郎、温度、時間経過およびガス濃度の影響を考慮した青果物の品質変化予測モデルの構築、日本生物環境工学会2009年大会、九州大学、2009.

⑮ 山田 浩徳、濱中 大介、田中 史彦、内野 敏剛、数種微生物に対する電磁波殺菌の特性把握、農業環境工学関連学会2009年合同大会、東京大学、2009.

⑯ 山名 志郎、内野 敏剛、田中 史彦、濱中 大介、水分活性および温度を考慮した微生物増殖挙動予測モデルの開発、第64回農業機械学会九州支部例会、佐賀大学、2009.

⑰ F. Tanaka, Y. Konishi, Y. Kuroki, D. Hamanaka, T. Uchino, The use of CFD to improve the performance of partially loaded cold store, 5th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agricultural and Biosystems Engineering, Fukuoka, Japan, 2010.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

内野 敏剛 (UCHINO TOSHITAKA)

九州大学・大学院農学研究院・教授

研究者番号：70134393

### (2) 研究分担者

田中 史彦 (TANAKA FUMIHIKO)

九州大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号：30284912

濱中 大介 (HAMANAKA DAISUKE)

九州大学・大学院農学研究院・助教

研究者番号：60399095