

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：20010～2012

課題番号：22380138

研究課題名（和文） 超微細ミストを用いた青果物低温高湿貯蔵システムの開発

研究課題名（英文） Development of low temperature and high humid storage system for fresh produce by using nano-sized mist

研究代表者

内野 敏剛（UCHINO TOSHITAKA）

九州大学・農研究院・教授

研究者番号：70134393

研究成果の概要（和文）：

超微細ミストを用いた青果物低温高湿貯蔵システムを構築するため、①貯蔵庫内温湿度、風速の数値流体力学（CFD）によるシミュレーション、②光触媒による庫内微生物の殺菌、③電気集塵法による庫内の集菌と集塵、④高湿度による蒸散抑制について検討を行った。その結果、庫内の温湿度と風速をCFDにより予測し詳細な分布を明らかにした。また、光触媒による殺菌の可能性と電気集塵の効率を示すとともに、超微細ミストが超音波ミストに比し、貯蔵中の青果物の重量減少を抑制する可能性を見出した。

研究成果の概要（英文）：

To develop a low temperature and high humid storage system for fresh produce by using nano-size mist, a simulation and experiments as follows were conducted; 1) simulation of changes in temperature, humidity and air velocity in a storage equipped with nano-size mist humidifier; 2) inactivation of microorganisms in the storage by photo catalyst; 3) removal of microorganism and dust in the storage by electrostatic precipitation; 4) control of transpiration of fresh produce stored in the high humid storage. As a result, a detailed distribution of temperature, humidity and air velocity was obtained and a possibility of disinfection and electrostatic precipitation in the storage was indicated. In addition a weight loss of fresh produce was controlled by the nano-size mist more efficiently than a larger size mist.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2012年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	11,700,000	3,510,000	15,210,000

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：流通管理

1. 研究開始当初の背景

青果物の品質、鮮度に影響を及ぼす要因は物理学的、化学的、生物学的、生理学的に分

類され、数多く存在する。これらの因子は低温にすることで多くを抑制することが可能であることから、予冷や低温貯蔵等の技術が

普及している。低温は微生物の活動や青果物の呼吸を抑える上で非常に有効であるが、一方で、もう一つの大きな品質劣化因子である蒸散には一部効果はあるものの、例えば、イチゴ、サクランボ、アスパラガス、ホウレンソウ等の青果物では温度にかかわらず蒸散が激しいため、低温だけでは表面のツヤ、張りなどを十分に維持することができない。

研究代表者らの研究では冷凍車内の湿度測定も行い、段ボール箱内の湿度でさえも経時的に変動し、70%を切る場合が見受けられた。青果物流通中の蒸散を確実に抑制するためには、貯蔵庫内の湿度の管理を行うことが重要で、また、高湿度が低温障害の低減に効果があるともされる。湿度と蒸散量に関する研究は国内外を問わず古くから行われている。しかしながら、一般的なルーム貯蔵では貯蔵庫内の空気が直接冷凍機の蒸発コイルにより冷却されるため、凝縮が起こり高湿を保つことが困難である。このため、ジャケット式の低温庫が利用され、エネルギー効率を上げ廉価に改造したタイプやジャケット式に準ずる二元調湿庫と呼ばれる低温庫、さらにジャケット式の空気の代わりに貯蔵庫壁面外部に水をブラインとして循環する冷温高湿貯蔵庫等、高湿度を維持する研究がなされてきた。これらはいずれも高湿度を安定的に得ることに成功し、青果物の貯蔵にも効果を上げてきている。しかしながら、ジャケット式に代表されるこれらの低温庫はいずれも高価であるため、農産物の貯蔵にはコスト的に問題で、また、低温流通に必要な冷凍車に用いることは構造上困難である。安価に、簡便に低温貯蔵庫内の湿度を上げるには超音波加湿器などの一般の加湿器を用いればよいが、液滴径が大きく低温庫内では気化しにくいいため、農産物、段ボール箱、壁面を濡らすことでカビの繁殖の原因となり、また段ボール箱強度低下の一因となる。これらの問題を解決し、低温高湿度環境を得るには、発生装置が冷凍車等にも比較的簡単に取り付け可能で、液滴径が小さく気化しやすい超微細ミスト（ナノミスト）を用いることが有効であると思われた。

2. 研究の目的

本研究の目的は青果物の低温高湿度貯蔵システムを確立することである。すなわち、現在提案されている高湿度貯蔵法の問題点を、ナノミストを用いることによって解決し、新たな高湿度貯蔵法を提案する。その基礎として、(1)貯蔵庫内の温湿度、風速等の測定、(2)これを基にした庫内環境変化のシミュレーション、(3)光触媒による貯蔵庫内の殺菌技術と電気集塵による集菌技術の確立、(4)95%以上の超高湿度が青果物の蒸散による重量減少に及ぼす影響の解明を行った。

3. 研究の方法

(1)温湿度、風速測定

温度は熱電対で測定し、測定点は、予測モデルの境界条件を決定するために冷凍機とミスト発生装置の吹出口の各1点、また、モデルの検証を行うためコンテナ中心付近の1点の計3点とした。湿度の測定点は温度の測定点の3点目と同様のコンテナ中心部とし、湿度測定器（HMT330, Vaisala 社製）によった。さらに、ナノミスト発生装置からの水蒸気供給速度を噴霧時間とタンク内水の減少量から求めた。風速は熱式風速計（Model 6500, 日本カノマックス社製）を用い、冷凍機吹出口のファン表面から40mmの位置で、中心線上に中心から45mmずつ各3点、計12点を測定した。この際、各点で吹き出し方向と半径方向の2方向の測定を行った。また、冷凍機ファン近傍で生じる渦流を考慮するため、スワール速度を実験値から近似して用いた。湿度、風速測定時の温度は5°Cとした。

(2)温湿度変化の予測

解析には、熱流体解析ソフトウェア ANSYS FLUENT 13.0 (ANSYS Inc.) を使用した。本ソフトウェアは一般的には質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式により流体の状態を解析するが、本研究では水蒸気の発生が加わるため、さらに化学種輸送方程式を加えて水蒸気の質量分率の解析を行った。また、偏微分方程式の空間座標に対する離散化を有限体積法によって行い、乱流を取り扱うため、標準 k-ε モデルを使用した。

図1に解析に用いたジオメトリを示す。庫内寸法は2330 mm×2130 mm×3470 mmで、コンテナ奥上部に冷凍機、床面にはナノミスト発生装置が設置されている。表1に解析条件を示す。冷凍機およびミスト発生装置の領域内温度は温度測定実験により得たデータに近似曲線を当てはめ時間の関数として表現した。また、冷凍機およびミスト発生装置の吹出口における風速がそれぞれ実測値の平均と近い値となるように、各吹出口においてそれぞれ40 Pa、450 Paの圧力上昇を仮定

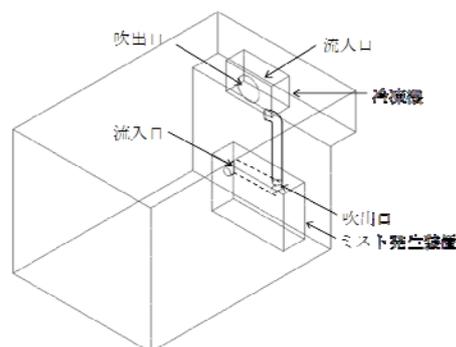


図1 コンテナのジオメトリ

したファン境界条件を設定した。ナノミストの発生速度は、実測より求めた値を用い、ミスト発生装置内および冷凍機内は相対湿度が90%を超えないものとした。

表1 解析条件

解析手法	非定常乱流解析	
計算ステップ	1秒	
コンテナ壁熱貫流率	$5.10 \times 10^{-1} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	
ミスト供給速度	$6.53 \times 10^{-2} \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$	
コンテナ外部温度	298 K	
圧力上昇値	冷凍機	40 Pa
	超音波ミスト発生装置	450 Pa
初期条件	コンテナ内部温度	298 K
	水の質量分率	1.20×10^{-2}

(3) 光触媒による殺菌と電気集塵法

① 光触媒による殺菌

光触媒による殺菌は光触媒を塗布した銅板上に菌懸濁液を塗り殺菌する方法(殺菌試験1)と粉末の光触媒を生理食塩水中に懸濁させこれに微生物を含んだ空気を流入し殺菌する方法(殺菌試験2)の2種を検討した。

殺菌試験1: 供試菌株として *Penicillium* 属菌, *Ps.oleovorans* および *S.enterica* を用いた。光触媒殺菌装置は、上部にブラックライト (UV-A) 4本を設置し、下部にアパタイト被覆 TiO_2 10% 塗布銅板 (20×20cm) を置いた。ランプ本数と照射距離を調整することで照射強度を変化させた。照射強度は 2.4, 4.4, 6.0, 10.0 W m^{-2} 、温度は 5, 25°C、相対湿度は 50, 95% とした。作成した菌懸濁液を適宜希釈し、2 mL を TiO_2 塗布銅板に塗り、コンラージ棒を用いて一様となるよう広げた。その後ブラックライトを光触媒塗布銅板に照射し、ぺたんチェック 25 (栄研化学株式会社) により銅板表面の菌を集菌した。照射時間は *Penicillium* 属菌では最大 180 min, *Ps.oleovorans* では最大 60min, *S.enterica* では最大 30 min とした。

殺菌試験2: 測定には、実際の農産施設から採取した粉碎穀と農産施設由来の塵埃をサンプルとして用いた。光触媒殺菌装置を図2に示す。流量 2.0 L min^{-1} の空気をボンベからガラス円筒容器内流入させた。測定中は、ガラス円筒容器内の塵埃をスターラにて攪拌し、流入空気とともに滅菌生理食塩水とアパタイト被覆 TiO_2 10% 光触媒を含んだインピンジャ容器に流入させた。このインピンジャ容器を室温 (25°C) に保ち、一定時間紫外線 (UV-A, 0.8 mW cm^{-2}) を照射した後、溶液を適宜希釈し培地に塗抹し培養した。一般生菌数の測定には PCA 培地を、カビ・酵母数の測定には PDA 培地を用いた。本実験では以上の光触媒区 (光触媒あり, UV 照射あり) の他

に、光触媒対照区 (光触媒あり, UV 照射なし), UV 区 (光触媒なし, UV 照射あり), 対照区 (光触媒なし, UV 照射なし) を設けた。

② 電気集塵

測定は光触媒殺菌と同様、乾燥空気を電気集じん装置内に流入した (図2)。測定中は、ガラス円筒容器内の粉碎穀をスターラにて攪拌し、流入空気とともに装置内に搬入した。装置は、円筒型電極 (集塵極) と線電極 (放電極) 及び円筒容器 (アクリル製, 内径: 36.0mm) から構成され、電極材料は SUS316、線電極の線径は 0.2 mm とした。線電極には可変直流高圧電源を接続し、オゾンを発生しない程度の直流電圧を印加し、集塵極は接地した。装置に直流電圧を印加し 30 分間空気を流し続けたものを実験区、電圧を印加しない状態 (0kV) で 30 分間空気を流し続けたものを対照区とした。装置を通過した空気中の粉碎穀は、殺菌試験と同様にインピンジャ法により捕集し、電気集塵装置の集塵効率を求めた。次に、捕集した測定後の滅菌生理食塩水を適宜希釈し、PCA 培地と PDA 培地に塗抹・培養した。これより、実験区のデータを対照区のデータで除し、微生物捕集率として算出した。

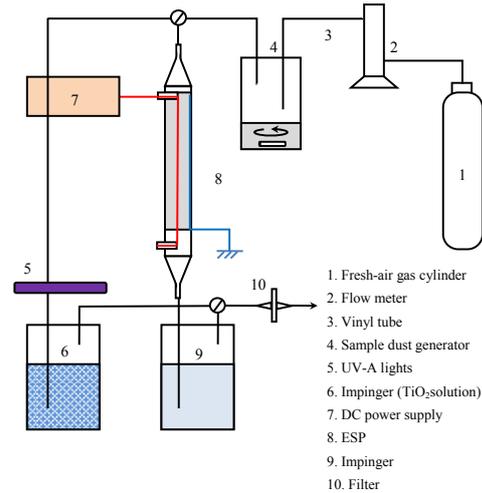


図2 光触媒殺菌装置および電気集塵装置概略 (光触媒殺菌では7, 8, 9を電気集塵では5, 6を取り外して実験する)

(4) 青果物の減量率

ナノミスト発生装置を設置したコンテナ内と超音波加湿器を設置した低温庫内 (対照区) にそれぞれミズナ, ナス, イチジク, を置き、温度約 5~7°C、相対湿度 94~96% で数日間の貯蔵試験を行い、重量減少率を測定した。また、同等の環境でミズナとイチジクの気孔面積を瞬間接着剤を用いた型取り観察法により測定した。温度と湿度の設定はナノミストと超音波加湿器で厳密に同一にすることができなかったため、ナノミスト側が蒸散抑制に対し不利になるよう、若干高温、低湿となるよう設定した。

4. 研究成果

(1) コンテナ内の温湿度の予測

冷凍機とナノミスト発生装置の吹出口における温度は測定開始時の約 25°C (298K) から 1600s で、それぞれ 1°C (274K), 9°C (282K) に指数関数的に減少した。これを指数関数として近似し、以下の式を得、予測モデル構築の際に境界条件として用いた。

$$T = (T_0 - T_f) \exp(-kt) + T_f \quad (1)$$

ここに、 T は冷凍機吹出口における温度 (K), T_0 は初期温度 (K), T_f は平衡温度 (K), t は時間 (s), k は冷凍機, ナノミスト発生装置で、それぞれ 6.59×10^{-3} , 3.96×10^{-3} , n はそれぞれ 7.78×10^{-1} , 8.75×10^{-1} である。

風速測定の結果から、スワール速度の近似を行い、これをファン境界条件として用いた。

コンテナ中心付近の初期相対湿度は 56.4% で、空気の水蒸気に対する水蒸気の質量分率は 1.20×10^{-2} となり、これを初期条件として用いた。また、ミスト発生装置の水蒸気供給速度は実験より $6.53 \times 10^{-2} \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ を得た。これらの初期条件、境界条件により、コンテナ内の温湿度変化、風速分布シミュレーションを行った。コンテナ中心付近の温度変化の傾向は定性的に予測値と実験値は一致したが、60 min 後の実測値が 278 K 程度であるのに対し、予測値は 276 K 程度となり、予測値が実測値を下回る結果となった。誤差は 15 min 後に最大 3K となった。

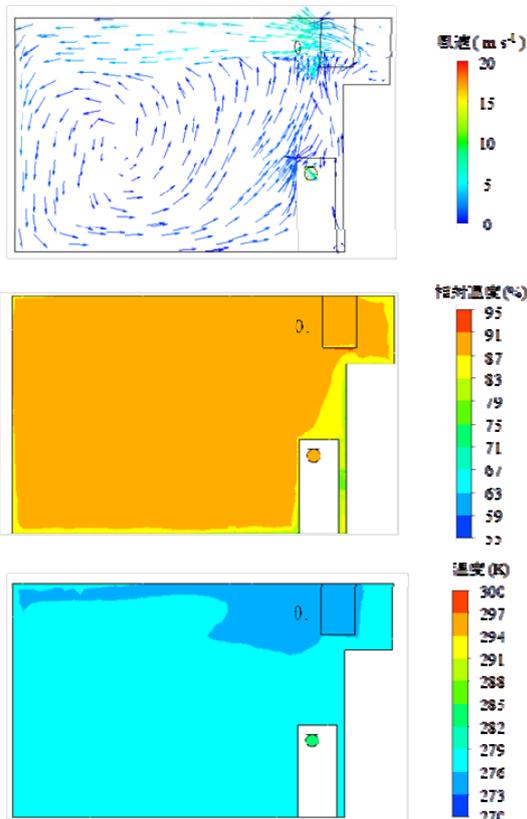


図3 冷凍機吹出口中心を通る断面における風速 (上)、相対湿度 (中)、温度分布 (下)

冷凍機吹出口中心を通る断面における風速、相対湿度、温度分布のシミュレーション結果を図3に示す。風速は冷凍機吹出口に対して鉛直方向に約 5 m s^{-1} となり、実測値に近い値となった。また、冷凍機吹出口の風向は外側への拡散が確認され、ファンからの吹き出しを再現できた。相対湿度は全体的に一様な分布となったが、冷凍機周辺においては温度が低いため湿度が高く凝縮が起きやすいと思われる、今後対策を検討する必要がある。温度は、冷凍機吹出口から吹き出す風速が大きいところほど低くなっており、これより冷凍機から吹き出す冷風の影響を再現していることが確認された。

ナノミスト発生装置吹出口を通る断面上では (図省略)、同吹出口における風速は約 12 m s^{-1} の速度を示しており、実測値と概ね等しい値となった。また、相対湿度はミスト発生装置のミスト発生管内および、ミスト発生装置吹出口周辺において 90% 程度と相対湿度の高い空気が多く存在することが確認された。温度は冷凍機の吹き出しの影響によりこの断面でも一部コンテナ上部において温度が低くなる場所が見られた。

上、中、下部の水平方向断面で検討すると、上部が最も風速が大きく、下部が最も小さかった。また、中部は気流が蛇行している様子が明らかになった。相対湿度は上方に行くほど高い傾向を示すが、冷凍機吹出口に向かい左上部に 85% 程度の湿度の低い部分が見られた。温度は上部の冷凍機とナノミストの吹出口、及び冷凍機と対抗する壁面 (入り口) 上部に一部低温部が見られるが、全体的にはほぼ設定温度の 5°C (278K) 程度となっている。

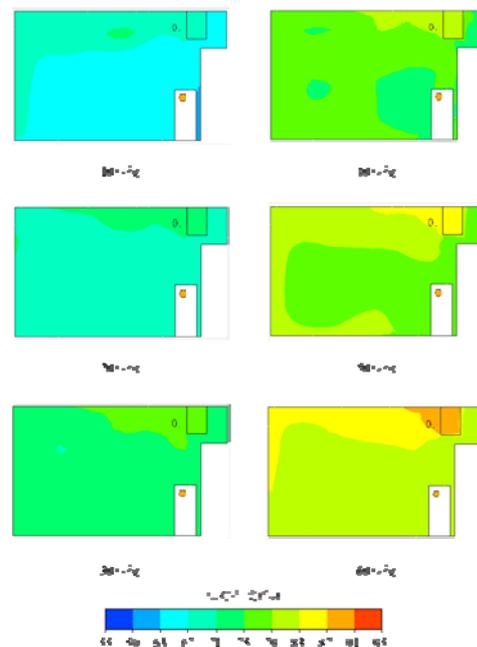


図4 冷凍機中心を通る断面における相対湿度の経時変化

図4にナノミスト噴霧開始後60s間のコンテナ内湿度の経時変化を示す。湿度が経時的に高くなっていく様子がよく再現され、冷凍機から吹き出す風の軌跡に沿って高くなった。また、上方が早く高湿になる様子が見られ、これらは冷凍機から吹き出される空気により、冷却され相対湿度が高くなるためと考えられる。この後、約100s以降については、ほぼ一定の湿度が保たれた。

(2) 光触媒による殺菌と電気集塵法

① 光触媒による殺菌試験1

温度25°C、相対湿度50%でUV-Aの照射強度を2.4から10.0W m⁻²に変えて、*Penicillium* 属菌の生存比を調査した結果、照射強度が強いほど生存比が低くなる傾向が見られたが、明確ではなかった。また、180 minの照射で生存率はほぼ0.1となった。生存比は照射時間により指数関数的に減少した。図5に*Penicillium* 属菌の温湿度による生存比の変化を代表として示す。ブラックライトのみを照射したときは生存比はほとんど変わらず、*Penicillium* 属菌にはUV-Aの殺菌効果はないと考えられる。25°Cで相対湿度50%と95%の殺菌効果を比較すると、高湿度の方が生存比は低く、湿度の上昇により殺菌効果が増加することが確認され、高湿貯蔵に光触媒殺菌は効果的と言える。しかしながら、5°Cでは高湿の効果が低減し、低温時には一考の要がある。*Ps.oleovorans* においても、湿度の上昇により、最大0.5桁程度の生存比の差が見られ、*S.enterica* でもわずかではあるが湿度による生存比の減少が見られたが、*Penicillium* 属菌と同様、低温高湿度では2菌種ともに殺菌効果は大きく向上しなかった。

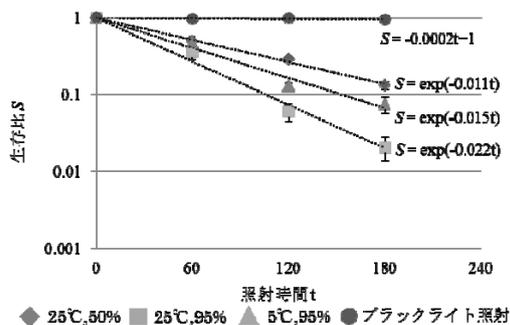


図5 照射強度 6.0W m²時の *Penicillium* 属菌の温湿度による生存比の変化

② 光触媒による殺菌試験2

図6に、光触媒濃度15%(w/w)における光触媒区、光触媒対照区、対照区の紫外線照射後の一般生菌数とカビ・酵母数を示す。これにより光触媒濃度15%(w/w)の条件で、一般生菌数およびカビ・酵母数を検出限界以下まで殺菌できることが示された。なお、本実験の条件下ではUV-A照射が光触媒殺菌に与える影響は見られなかった。また、光触媒処理

区の一般生菌数とカビ・酵母数の経時変化を調べた結果、これらは殺菌試験1と同様に指数関数的に減少することが明らかとなった。

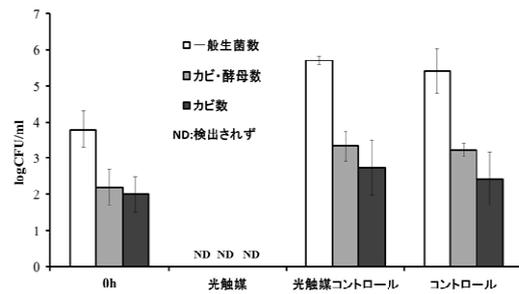
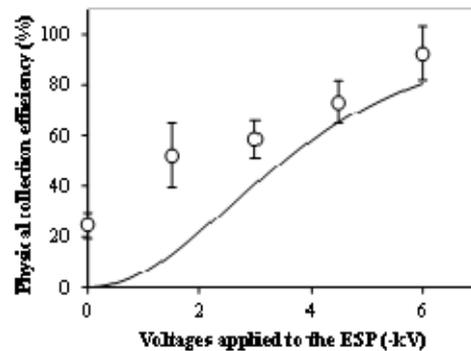


図6 光触媒区および光触媒対照区、対照区の紫外線照射(24h)後の一般生菌数とカビ・酵母数. 光触媒濃度15%(w/w).

③ 電気集塵

電気集塵機の微生物捕集率はバクテリアでは-6kVで99.95%、カビ・酵母では98.79%の高率を示した。電圧の減少に伴いカビ・酵母では-1.5kVで69.3%まで減少するが、バクテリアでは94.61%と高い値を維持した。一方集じん効率率は図7に示すように-6kVでも90%程度で微生物捕集率を下回った。サンプルの粒子の誘電率と粒径を測定し、Deutschの式を用いて電気集じんの集じん効率を定性的に予測した結果、集じん効率は粒子径および粒子付近の電界に大きく影響されるこ



とが明らかとなった。

図7 集塵効率

(3) 青果物の減量率

ナス、ミズナを設定温度5.5°C、イチジクを7°Cで、ナノミスト(N区)と超音波ミスト(US区)で加湿し、重量減少率を比較した。庫内湿度はナス、ミズナが約96%、イチジクでは約94%で、N区と比べた時、US区が若干高めか同等であった。ナス、ミズナ、イチジクでそれぞれ10、6、8日貯蔵後の減量率はナス:5.3%(N区)、8.5%(US区)、ミズナ3.7%(N区)、7.3%(US区)、イチジク8.8%(N区)、14.8%(US区)となり、ナノミストが超音波ミストより重量の減少を抑制した。ミズナとイチジクの気孔開口面積を調査した結果、US区が大きくなった。こ

のことから、ナノミストが重量減少を抑制する理由として、超音波ミストの粒径が大きいためから気化しにくく、液体として直接青果物表面を濡らすため、孔辺細胞が膨潤し気孔の開度が大きくなったことが考えられるが、さらなる調査が必要である。

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 6 件)

1) Koide, S., Nakagawa, A., Omoe, K., Takaki, K., Uchino, T. (2013) Physical and microbial collection efficiencies of an electrostatic precipitator for abating airborne particulates in postharvest agricultural processing, *J. Electrostatics*, in Press. DOI:10.1016/j.elstat.2013.04.002. 査読有

2) Tanaka, F., Konishi, Y., Kuroki, Y., Hamanaka, D., Uchino, T. (2012) The use of CFD to improve the performance of a partially loaded store, *J. Food Process Eng.*, 35 (6), DOI: 874-880,10.1111/j.1745-4530.2011.00636. 査読有

3) Koide, S., Yasokawa, D., Omoe, K., Uchino, T. (2012) Concentration of airborne microorganisms in a rice storage facility, *J. JSAM*, 74, 244-246. 査読有

4) Hung, D.V., Tong, S., Tanaka, F., Yasunaga, E., Hamanaka, D., Hiruma, N., Uchino, T. (2011) Controlling the weight loss of fresh produce during postharvest storage under a nano-size mist environment, *J. Food Eng.*, 106(4), 325-330. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2011.05.027. 査読有.

5) Hung, D.V., Tanaka, F., Uchino, T., Hiruma, N. (2011) Using nanomist humidifier to maintain postharvest quality of fig (*Ficus carica* L.) fruit in high humidity storage environment. *J. Fac. Agr., Kyushu Univ.*, 56(2), 361-365. 査読無

6) Koide, S., Uchino, T., et al. (2011) A case study of airborne microorganisms in postharvest facilities, *Proceeding of Int. Workshop on Agric. and Bio-Systems Eng.*, 141-144. 査読有

[学会発表] (計 11 件)

1) 中川 光, 小出章二, 折笠貴寛, 内野敏剛, 高木浩一: 農業施設を想定した空中浮遊菌の捕集に関する基礎的研究, 農業環境工学関連学会合同大会, 2012年9月12日, 宇都宮大学, 栃木.

2) 村田大地, 小出章二, 折笠貴寛, 内野敏剛, : アパタイト被覆二酸化チタン光触媒殺菌の基礎的特性の解明とそのポストハーベストへの応用, 農業環境工学関連学会 2012年9月12日, 宇都宮大学, 栃木.

3) 内野敏剛: 新技術を用いた青果物の高品質保持技術, 第123回農産物流通技術研究会例会, 2012年9月7日, 南青山会館, 東京.

4) 永山 彩, 内野敏剛, 田中史彦, 濱中大介: 低温高湿貯蔵における *Penicillium* 属菌の光触媒殺菌法の確立, 第66回農機学会九州支部例会, 2012年8月31日, サンホテルフェニックス, 宮崎.

5) 小出章二, 中川光, 村上光, 高木浩一, 内野敏剛: 農産施設空間内のバイオエアロゾルの捕集とその応用, 第70回農機学会年次大会, 2011年9月28日, 弘前大学, 青森.

6) 門柳貴士, 田中史彦, 内野敏剛: 低温高湿貯蔵庫内の光触媒殺菌法, 第70回農機学会年次大会, 2011年9月28日, 弘前大学, 青森.

7) 黒木 禅, 田中史彦, 内野敏剛: CFDを用いた青果物における冷却最適化, 第70回農機学会年次大会, 2011年9月28日, 弘前大学, 青森.

8) 小出章二, 村田大地, 荒川英美, 渡部一輝, 重茂克彦, 内野敏剛: 光触媒を用いた農産施設内の空中浮遊菌の殺菌に関する一提案, 第70回農機学会年次大会, 2011年9月27日, 弘前大学, 青森.

9) Hung, D.D., Tanaka, F., Uchino, T.: Assessment of postharvest attributes of fig (*Ficus carica* L.) fruit stored under high humidity environment, *Int. Symposium of CIGR.*, 2011年9月20日, タワーホール船橋, 東京.

10) 村田大地, 小出章二, : 農産施設における空中浮遊菌の殺菌に関する基礎的研究, 平成23年度農機学会東北支部大会, 2011年8月18日, 岩手県農業研究センター, 岩手.

11) Hung, D.V., Tanaka, F., Hamanaka, D., Uchino, T.: Control of Weight Loss of Fresh Produce under High Humidity Storage Environment, 69th JSAM Annual Meeting, 2010年9月15日, 愛媛大学, 愛媛.

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

(3)連携研究者

小出 章二 (KOIDE SHOJI)
岩手大学・農学部・准教授
研究者番号: 70292175