

農業施設に関わる研究・技術の最近の展開

青果物の低温流通と貯蔵施設について

誌名	農業施設
ISSN	03888517
著者名	田中,史彦 田中,良奈
発行元	農業施設学会
巻/号	49巻2号
巻号補足	
掲載ページ	p. 1-11
発行年月	2018年6月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



農業施設に関わる研究・技術の最近の展開

—青果物の低温流通と貯蔵施設について—

田中史彦・田中良奈

九州大学大学院農学研究科農産食料流通工学研究室, 〒812-8581 福岡県福岡市

はじめに

1965 年に出された「食生活の体系的改善に資する食料流通体系の近代化に関する勧告」（いわゆる「コールドチェーン勧告」）は、我が国の低温流通におけるインフラ整備を推し進める原動力となり、食品産業の発展に大きく寄与してきた。土居（2001 年）はコールドチェーンの歴史を 3 つの期間に分け、それぞれの特徴について述べている。まず、コールドチェーンの成立期（1965～1973 年）においては、青果物の予冷装置や冷凍車、家庭用冷蔵庫、業務用セントラル・キッチン方式の普及がこの時代を象徴し、生産地から消費地までが柔軟に結びついた時期であるとしている。図 1 は、この先駆的研究となった移動式真空冷却予冷装置（鹿児島大学農学部）であるが、これらが普及することで我が国の食料流通体系の近代化が始まったといえる。次に、展開期（1973～1989 年）においては、1973 年の「食品衛生法」等の一部改正によって冷凍食品の取扱基準が強化され、これを満たすための設備投資が義務付けられた。この改正が契機となり業務用冷凍食品の生産量が増加、急速な大規模化が進む時期となった。さらに、1990 年以降は冷凍食品の輸入を中心にコールドチェーンのグローバル化が進んだ時期としている。このように、コールドチェー

ンが発達・普及した今日においては、適切な低温管理により新鮮な青果物や高品質な冷凍食品等が全国規模で広く流通することとなっている。しかしながら、コールドチェーンの普及は低温保管による食品の日持ち性の向上と廃棄物削減という正の効果がある反面、流通・貯蔵時にエネルギーを要するという負の効果も併せ持つ。このため、コールドチェーンには関連技術の高度化による日持ち性の向上と使用エネルギーの削減の両立が求められるようになっている。

このような背景の下、2008 年度に農林水産省が設置した「食品産業技術検討委員会」において、5 つの社会的要請領域に関する指摘がなされ、特に、①食の安全、品質管理の徹底、信頼性の確保、②資源利用の効率化、コスト削減、副産物利用、廃棄物削減・リサイクル・省エネ・CO₂ 削減、③国産農畜産物の利活用の増進、自給率向上、地域活性化への対応に関して、2009 年度に農林水産省食農連携促進技術対策事業「食品技術産業ロードマップ策定委員会」が 5 年後の実用化を見据えた取りまとめを行っている（宮尾，2012）。このうち、②における小テーマ「鮮度保持・日持ち向上による廃棄物削減（コールドチェーンの標準化）」と「ネオフリージング技術によるコールドチェーンの再構築」を具現化する組織としてコールドチェーン高度化開発普及協議会が設立され、広域化した青果物流通と保管・貯蔵を支える要素技術やシステム開発の方向性が示された。これにより、「コールドチェーン技術の高度化・標準化」が今日的課題として再度クローズアップされている（鈴木，2013）。

さらに、2016 年 1 月に閣議決定した第 5 期科学技術基本計画の中で、経済・社会的要請に対応すべき重点課題のひとつとしてスマート・フードチェーンシステムの確立が謳われ、輸出にも対応可能な品質管理技術、鮮度保持技術、長期保存技術等の開発が求められるようになっている。

このような社会的背景に鑑み、本報ではこれを支える技術の動向を紹介するとともに、今後、解決すべき技術的課題等についても述べ、低温流通・貯蔵技術の高度化に資するものとした。



図 1 1965 年開発の移動式真空冷却装置
（提供：鹿児島大学農学部食料環境システム学研究室）

原稿受領 2018 年 1 月 15 日

照会先：田中史彦 fumit@bpes.kyushu-u.ac.jp

空調調和と低温流通・貯蔵施設

1. 空調調和

青果物は収穫後も呼吸を続けて生体を維持している。このため、収穫後は生育過程において蓄積された成分が消費されるとともに、蒸散による水分損失も生じることから鮮度や品質が速やかに低下してしまう。よって、低温下で呼吸を抑制するとともに、蒸散を減じて品質保持に努めることが貯蔵の基本となる。また、低温によって微生物の活動を抑制することは流通段階を経て消費者に至るまでのサプライチェーンにおける損失の低減や食の衛生管理の上で極めて重要な課題でもある。青果物の流通・貯蔵を適切に管理するためには、収穫後の青果物の生理と流通・貯蔵環境との関係を深く理解した上で適切な空調調和条件を見出すことが肝要であり、特に、温度や湿度、ガス組成、微生物の管理を青果物の品目や熟度ごとに確実に行うことが必要である。以上の観点から、流通と貯蔵における各環境要因の制御と現状について解説する。

2. 予冷・貯蔵施設

1) 予冷施設

(1) 予冷の現状

一般に、青果物は収穫後産地予冷を行うことによって日持ち性が維持される。予冷とは、貯蔵用の大型冷蔵庫、冷凍車などの定温輸送車両へ対象物を搬入する前に品温を冷蔵温度まで下げる操作をさし、これに用いる冷却装置を予冷冷却装置とよぶ。主な予冷設備としては冷風冷却方式（強制通風方式、差圧通風方式）、真空冷却方式、冷水冷却方式があるが、現在、葉菜類では真空冷却方式が、果実などについては強制通風方式または差圧通風方式が主流となっており、冷水冷却方式はあまり普及していない。表1に国内予冷施設数を示す。本表は農林水産省大臣官房統計部によって2006年9月～10月に調査された青果物・花き出荷機構調査報告である。予冷施設数は1998年の3519から増え2001年に4883のピークを迎え、その後農協の統廃合などにより減少し、2006年に3692となった。このうち真空予冷施設数のみ1998年の459から2001年に693、2006年は728と純増しているが、これは真空冷却が均一かつ急速な冷却を可能とする利点によるものであろう。農林水産省食品流通局野菜流通課の調査によると、古いデータであるが1996年産野菜のうち、品目別予冷出荷量はレタスが最も高く全体の18.5%を占め、ついでキャベツの16.1%、ハクサイの12.0

%というように、葉菜類が予冷出荷量全体の47%を占める。予冷方式別では、真空冷却方式が50.4%と圧倒的に多く、強制通風方式が34.7%、差圧通風方式が14.9%と続いている。

(2) 予冷施設の実例

図2に米国で使用されている真空冷却装置をそれぞれ示す。真空冷却槽は角型と丸形があるが、角型はパレット積み青果物の処理を行う際にデッドスペースが少ないため容積が稼げ、2t以上の処理では角型が使われている。そのうち我が国で最大容積を持つ冷却槽は50m³程度で、一度の処理で6t程度の青果物が予冷できる。真空槽に敷設するレール上をパレット積みされた青果物が移動し、所定の量に達したところで扉が閉まり、真空ポンプによる減圧で冷却が始まる。真空冷却は予冷対象物の雰囲気圧力を下げることで産物自体の持つ水分が急激に蒸発し、気化熱によって品温が下がる仕組みを利用したものであり、真空冷却槽内に気化した水蒸気はコールドトラップで凝縮し、水として排除される。水は4.6 Torr (610 Pa) では0℃で気化する。図3は種々の青果物の真空冷却特性を示したものであるが、ナスやニンジンなどに比べ、レタスのような結球菜類では冷却が早く、かつ均一に冷えることが分かる（早川ら、1983）。この利点が広く認識され最近では食品製造産業への普及も広がっている。

つぎに、冷水冷却方式についてであるが我が国での実用例は少ない。図4は米国で使用されている間欠シャワー式の冷水冷却予冷装置（上図）であるが、コンベヤを装備していないためフォークリフトによる搬入・搬出が必要である（下図）。水冷方式は空冷方式に比べ青果物表



図2 真空冷却予冷装置（米国・カリフォルニア）

表1 2006年予冷施設保有状況（内野，2013）

品目	集出荷 組織数	真空冷却式		差圧通風式		強制通風式		施設数計
		保有組織数	基数	保有組織数	室数	保有組織数	室数	
野菜	2110	290	668	274	625	567	1760	3053
果実	1600	34	60	66	147	177	432	639
計	3710	324	728	340	772	744	2192	3692

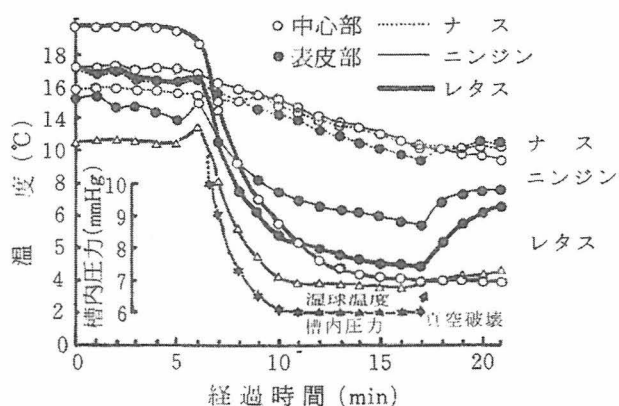


図3 種々の青果物の真空冷却特性 (早川ら, 1983)

面での熱伝達率が大きく冷却は速やかであるが、冷却用水の処理や微生物的危害防止の観点から我が国での普及の見込みは小さい。

最後に、通風冷却方式についてであるが、パレット積みから冷却までの一連の作業は自動化されている場合が多い。選別後、段ボール詰めの中果物がパレットに積みコンベヤ上を移動し、予冷库に搬入、強制通風により冷却されることとなる。このため、労働者の低温庫内における作業は極力抑えられる。出荷時はコンベヤで冷凍車まで移動、作業によって荷積みされる。保管庫は自動ラック式のものも多い。このように、選果包装施設の多くは1980年代頃より自動化・情報化され、搬入から出荷まで一元管理されている。強制通風方式では段ボール箱の積み方によって冷却速度に大きな差が出ることから、パレットラックの使用や段ボール箱に開けられた通気口の位置合わせなど、細かい点に配慮する必要がある。積付法の違いによる冷却速度への影響については、第3章の数値流体解析による低温流通・貯蔵施設の設計・制御の最適化で解説する。

この他、強制通風方式では予冷と同時に低温炭酸ガス燻蒸による殺虫を試行した例もある (江嶋ら, 2016; 法村ら, 2016) (図5)。気密性の高い低温予冷库に炭酸ガスを注入し、庫内炭酸ガス濃度を40%程度に調整、24

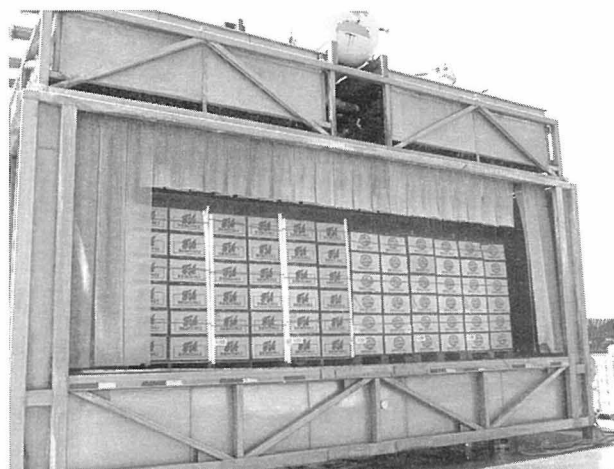


図4 間欠シャワー式冷水冷却予冷装置 (上図) と積み込みの様子 (下図) (米国・カリフォルニア)

時間かけて予冷と殺虫を行う方法である。この事例ではカキ果実のヘタ下に生息するフジコナカイガラムシを殺虫することに成功している。しかしながら、炭酸ガス価格が販売価格に上乗せされるため一部での使用にとどまっている。Tanaka *et al.* (2016) は貯蔵害虫の殺虫に窒素ガスが有効であることを示しており、今後、大気組成を調整したCA (Controlled Atmosphere) 貯蔵で利用される空気中から窒素ガスを分離する装置の利用なども考えられよう。

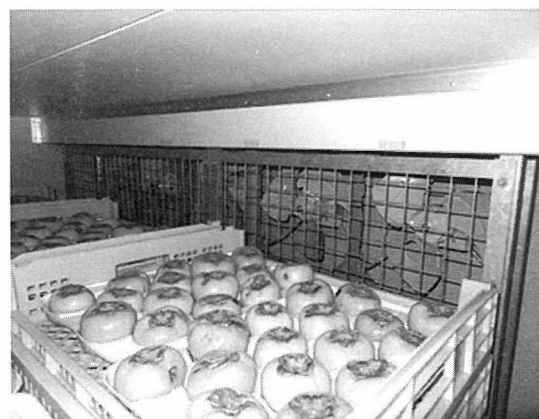


図5 炭酸ガス殺虫装置の外観 (左) と内観 (右)

2) 低温貯蔵施設

(1) 低温貯蔵の現状

前出の農林水産省大臣官房統計部のデータでは、2006年における種類別の青果物貯蔵施設の棟数（カッコ内は2001年）は、普通倉庫が1444棟（1679棟）、低温貯蔵庫が2213棟（2610棟）、CA貯蔵庫が210棟（199棟）、総数3867棟（4488棟）となっており、CA貯蔵庫以外は減少している。農業協同組合及び同連合会一斉調査による総合農協統計表では、冷蔵施設を含む青果物貯蔵施設数は2007年の2198箇所から2015年の2054箇所と引き続き減少傾向にある。椎名（1999）は農林水産省の統計データをもとに野菜の貯蔵量・出荷量・貯蔵割合を集計、表2のようにまとめている。これによると、タマネギ、パレイショ、ナガイモの貯蔵量が多いが、このうち冷蔵倉庫に貯蔵される割合は順に26%、25%、95%と品目による差が大きく、全体でみると42%程度が冷蔵倉庫に貯蔵されている。野菜全体の出荷量1389万tに対する貯蔵割合は5.1%に止まり、うち冷蔵倉庫に貯蔵されるものはわずか2.1%に過ぎない。貯蔵割合を向上させるためには、貯蔵に適した品種の改良・選定や、個体の選別が必要となろう。CA冷蔵貯蔵については、表3にいくつかの青果物に対してその適正貯蔵条件と貯蔵可能期間を示す（例えば、農産物流通技術研究会編、2011）。わが国では、特にリンゴについての導入例が有名であり、1965年ごろ国の補助事業によりリンゴ主生産地を対象に約800t収容規模の大型施設が設置された（工藤、1982）。近年では、例えば青森県で貯蔵されるリンゴ370千tのうちCA冷蔵庫で貯蔵される割合は2015年に約45%にも達しており、CA貯蔵の割合は年々増え続けている。現在のCA貯蔵施設では、空気中に大量に存在する窒素ガスを酸素と分離してCA冷蔵庫内に導入、気体組成を調整する窒素ガス置換方式が主流となっており、自動ラック式やCA環境管理ネットワークシステムを備えるものが増えている。また、最近ではCA機能を備えた輸送用のリーファーコンテナも開発されており、実例として温度1℃、湿度90%、酸素濃度3.5%、

二酸化炭素濃度2%程度を保持したままシンガポールへ輸送した試験報告もある。著者らが現在開発中の混載船舶輸送用多温度帯コンテナの開発と合わせて（關屋ら、2017；田中ら、2017）、我が国が推進する青果物輸出促進の一助となることが期待される。

(2) 低温貯蔵施設と環境負荷低減

青果物の貯蔵では低温高湿度環境を安定して維持することが重要である。同時に、これが環境に配慮したシステムであることが求められる。環境負荷低減策としては、まず、代替冷媒の開発があげられる。1928年に開発されたフロンは不燃性で化学的に安定し、液化しやすいという性質を持ち、冷凍機の冷媒として理想的なガスとされ、冷凍機の冷媒はCFC（クロロフルオロカーボン、1995年製造中止）とHCFC（ハイドロクロロフルオロカーボン、2020年製造中止予定）で占められるようになった。1960年代以降、爆発的に普及したが、オゾン層破壊物質であるとの認識が広まり、代替フロンとして塩素を持たないHFC（ハイドロフルオロカーボン）が普及してきた。しかしながらHFCは温暖化係数が高いため、これに替わる新たな冷媒が求められている。例として自然冷媒である二酸化炭素を用いた冷凍機が開発されているが、高圧、高気密、高真空など現行のHFCを用いた冷凍機に比べて割高であり、今後解決すべき課題のひとつとなっている。

エネルギーの観点からの環境負荷低減策としては、冷凍機を構成する各要素の性能向上や、システムとしての機能や制御性の向上を図ることによって冷凍サイクルのCOP値を上げる努力、貯蔵庫の断熱材開発や熱侵入箇所特定など断熱性能の向上を図ることが大切とされている。

(3) 低温高湿維持の効果

一般に青果物は水分が3～5%減少すると商品価値が失われると言われており、収穫後において蒸散を防止することは青果物の日持ち性向上にとって重要な課題となる。蒸散の駆動力は青果物表面の蒸気圧と雰囲気蒸気圧の差であり、この差を極力小さく保つことが蒸散抑制

表2 野菜の貯蔵量・出荷量・貯蔵割合（椎名、1999）

	貯蔵量 (t)			出荷量 (t)	貯蔵割合 (%)
	冷蔵倉庫	その他倉庫	合計		
キャベツ	13 870	1740	15 610	1 296 000	1.2
タマネギ	80 800	229 100	309 900	1 075 000	28.8
ナガイモ	48 680	2598	51 280	133 300	38.5
ニンニク	791	2263	3054	14 540	21.0
ハクサイ	15 310	30	15 340	858 400	1.8
パレイショ	55 030	164 100	219 100	2 447 700	9.0
その他	80 840	10 380	91 210	—	—
合計	295 300 ^{a)}	410 200 ^{a)}	705 500 ^{a)}	13 890 000 ^{b)}	5.1

a) 十の位を四捨五入

b) 椎名（1999）が算出

表3 CA貯蔵条件と貯蔵可能期間

青果物	貯蔵温度 (℃)	相対湿度 (%)	最適酸素濃度 (%)	最適二酸化 炭素濃度(%)	貯蔵可能期間 (空气中)	貯蔵可能期間 (CA中)
リンゴ (旭 & ニュートン)	3		3	5	4 ヶ月	200 日
リンゴ (旭 & ニュートン以外)	0		3	3	200 日	10 ヶ月
アンズ	0		1～2	2～3	2 週間	50 日
ブルーベリー	0		10	11	2 週間	6 週間
サクランボ	0		1～2	5～10	3 週間	4 週間
ネクタリン	0		1～3	5	3 週間	6 週間
モモ	0		1～2	5	3 週間	8 週間
グレープフルーツ	7		2～5	2～5	4 週間	6 週間
レモン	15		3～5	0～5	130 日	220 日
ライム (ペルシアン)	10		5	7	3 週間	6 週間
オレンジ (バレンシア)	1		15	0	6 週間	12 週間
イチゴ (ダナー)	0	95～100	10	5～10		4 週間
トマト	6		3～10	5～9		5 週間
露地メロン (札幌キング)	0		3	10		1 ヶ月
ハウレンソウ	0		10	10		3 週間
サヤエンドウ	0	95～100	10	3		4 週間
レタス	0	95～100	10	4		2～3 ヶ月
ハクサイ	0	90	3	4		4～5 ヶ月
ニンジン	0	95	10	6～9		5～6 ヶ月
ニンニク	0	85～90	2～4	5～8		10～12 ヶ月
ナガイモ	3～5	90～95	4～7	2～4		8～10 ヶ月
パレイショ (男爵)	3	85～90	3～5	2～3		8～10 ヶ月
パレイショ (メークイン)	3	85～90	3～5	3～5		7～8 ヶ月

の基本となる。青果物の水分活性は 0.98 程度であるため (Mahajan *et al.*, 2008), 飽和蒸気圧の 0.98 倍が青果物表面における蒸気圧となる。青果物表面からの水分の蒸散速度は単位時間、単位面積当たりの質量減少量であり、次式で表される。

$$\frac{dm}{dt} = k p_s (\phi_s - \phi) A \quad (1)$$

ここに、 m : 青果物中の水の重量 (kg), t : 時間 (s), A : 蒸散面積あるいは気孔開口面積 (m^2), p_s : 飽和水蒸気圧 (Pa), k : 圧力基準の移動係数 (s/m), ϕ : 相対湿度 (decimal), ϕ_s : 青果物表面の平衡相対湿度 (decimal)。圧力基準の移動係数は風速などの影響を受け、一般に、風速が大きくなると濃度境界層の厚さが薄くなり、蒸散はより速やかに行われることとなる。このため、青果物に直接風を当てることは品質保持の観点から極力避けなければならない。0℃付近の低温貯蔵では急速な蒸散による潜熱の影響で氷結が起こる原因ともなりうる。式 (1) からわかる通り、相対湿度 90 % 以上の高湿度で貯蔵しても青果物の表面における ϕ_s が 0.98 以上であることから蒸散を完全に抑制することは包装材を使用すること以外に不可能である。

蒸散抑制のためには低温にすることも青果物の種類に

よっては効果的であるが、イチゴやサクランボ、ブドウ、キュウリ、ハウレンソウのように温度に無関係に蒸散が激しく起こるものがあるため (樽谷 1963), このような場合には、低温のみならず、貯蔵庫内の湿度を高く維持する工夫がなされている。Paull (1999) は、ほとんどの青果物の最適湿度は 85 % 以上で、葉菜類では 95 % を超えるとしている。朝倉ら (1998) は、質量が 5 % 減少する日数を鮮度保持の限界とした場合に、相対湿度 90 % 以上では日持ち性が向上することを報告している。しかしながら、低温高湿状態を長期安定的に維持することは難しく、わずかな温度変化が結露を生じさせる原因となる。この結露の発生は微生物の繁殖を促し、青果物の腐敗へとつながる。このため、青果物の鮮度保持には温度変化を極力抑えた空調管理が不可欠である。

(4) 低温高湿貯蔵技術

図 6 に示すような一般的なルーム貯蔵においては、貯蔵庫内の湿り空気が冷凍機の蒸発コイルにより冷却され、空气中に存在する水分の一部がコイルで凝縮して湿度が低下するため、高湿を保つことが困難となる。実際の低温庫内での湿度は段ボール箱内でさえも経時的に変動し、相対湿度は 70 % を切る場合が見受けられる。これを避けるため、定置型貯蔵庫ではジャケット式の低温



図6 低温貯蔵庫（福岡県農林業総合試験場資源活用研究センター）

庫が利用されている。エネルギー効率を上げ、廉価に改造したタイプ (Lehmann and Fergason, 1984) やジャケット式に超音波加湿器を組み込んだ二元調湿換気式低温貯蔵庫 (王ら, 1997; 田中ら, 1999), さらに、冷媒を貯蔵庫の壁面内で循環させる冷熱輻射方式冷蔵庫 (田中ら, 1998) 等についての研究がなされ、これらはいずれも高湿を安定的に得ることに成功しており、青果物の貯蔵に効果を上げている。図7は田中ら (1999) により開発された二元調湿換気式低温貯蔵庫の概略図である。本機の特徴は低温庫内に仕切りを設けることで2室に分けし、室1に設置したユニットクーラーと超音波加湿器によって温湿度を調整、貯蔵庫となる室2の温湿度は室1-室2間に設けた換気ファンと仕切りからの熱通過によって制御される。このため、室2の温湿度は図8の白抜き○が示すように、温度変動幅 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度変動幅 $\pm 1.7\%$ と安定維持が可能であるとの報告がなされている (王ら, 1997)。ただし、熱・水分の供給調整区となる室1には青果物を貯蔵することはできず、積載可能率は低くなること、貯蔵室へのアクセスが悪くなるこ

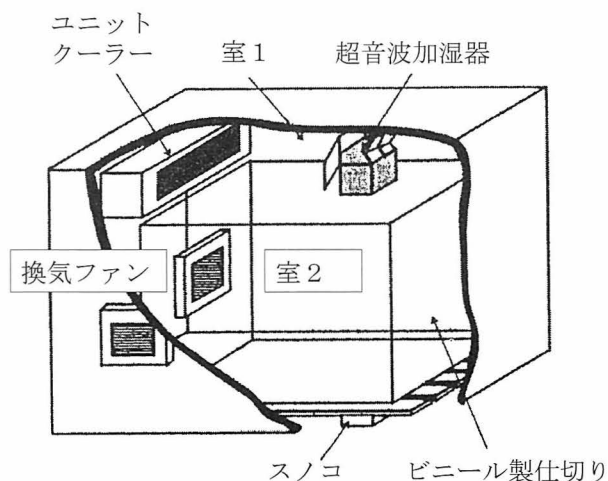


図7 二元調湿換気式低温貯蔵庫 (田中ら, 1999)

とが欠点としてあげられ、改善の余地がある。

最新の研究では、ナノサイズの微細液滴を低温庫内に噴霧し、低温高湿を安定的に維持する装置も開発されている。低温庫内の湿度を上げるには単純には微細液滴を噴霧すればよいが、非常に湿度が高い状態では、粒径の大きな液滴は気化せずそのまま落下し、青果物や包装容器を濡らす危険性がある。濡れは微生物の増殖や段ボール箱の強度低下を引き起こす原因となるため、著者らはナノサイズの超微細ミストを発生するナノミスト発生装置を冷凍コンテナに組み込み温湿度を管理する方法を提案した。この方法はそのまま低温庫への応用が可能であり、経済性がクリアできれば普及が期待できる技術のひとつである。このナノミスト発生装置は側面がステンレスメッシュの円筒型回転体中に水を供給し、遠心力で水をメッシュに衝突させることで微細化を図り、空気流により微細なミストのみを機外に放出して噴霧する構造となっている。本装置から噴霧されるナノミストの粒径は超音波加湿器によるものに比べ非常に小さく、また、短時間で気化するため液滴として青果物や段ボールを直接濡らすことが少ない (図9)。最新の装置は架台部分を除くと405 mm (L) × 355 mm (W) × 325 mm (H) と小型化され、回転数を4750 rpm (79 Hz) まで上げることが可能で、その際の算術平均粒径は69 nmになる。5 $^{\circ}\text{C}$ の環境で噴霧を行ったとき、回転数が3500 rpm (58 Hz) と低い条件では、粒度分布はブロードでモード粒径は40 nmを超えるが、4750 rpm では分布はシャープになり、モードも30 nm程度になる (Doung et al., 2010b, 2013)。より微細な液滴の生成は速やかな水

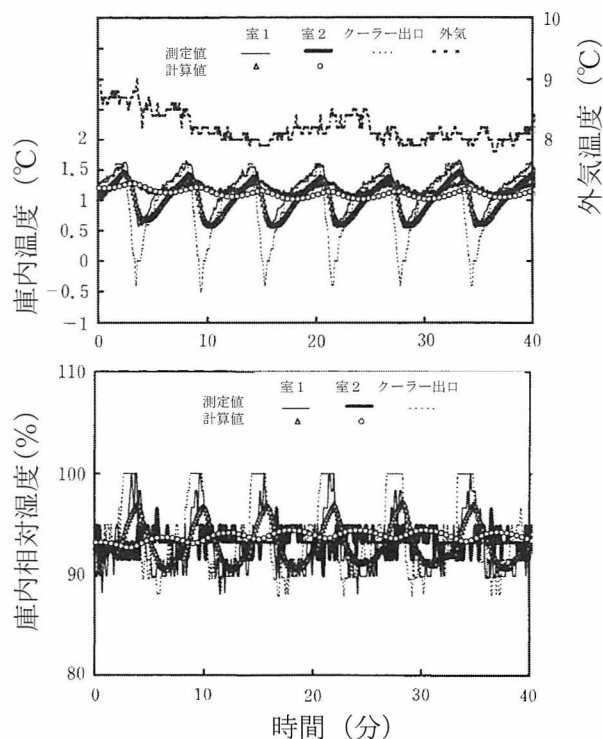


図8 二元調湿換気式低温貯蔵庫内温湿度変化 (王ら, 1997)

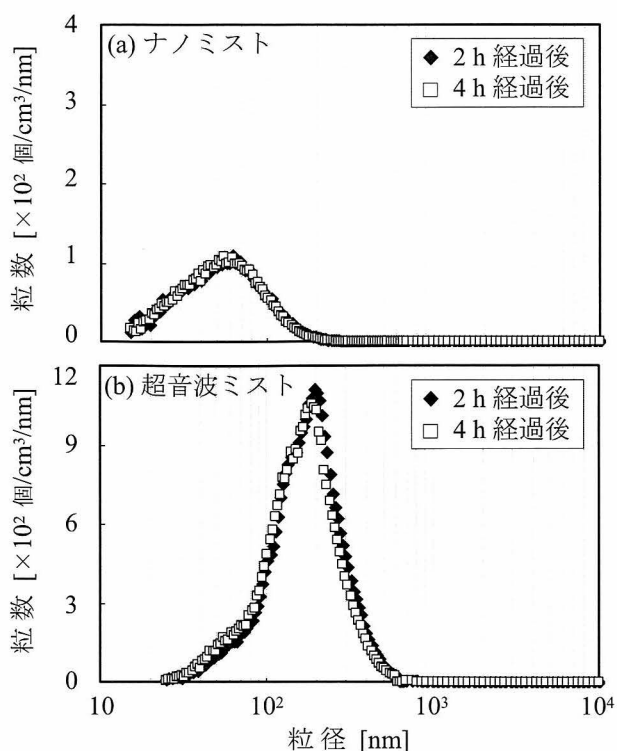


図9 ナノミスト（上）と超音波ミスト（下）の粒度分布の比較（Doung *et al.*, 2013）

分の蒸発を促すため、いかにして微細な液滴を作ることが濡れを防止する鍵となる。

Doung *et al.* (2011a, 2011b) は青果物のナノミスト噴霧による蒸散の抑制効果を調査するため、ナス、ミズナを設定温度 5.5℃、イチジクを 7℃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。貯蔵後（ナス、ミズナ、イチジクでそれぞれ 10, 6, 8 日後）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、ナノミストは超音波ミストに比し、質量の減少を抑制できた。この結果は、ナノミストの有効性を支持する実験結果であるが、データ数が少ないため、さらなる検証が必要である。その他、気化しやすいナノミストは青果物ばかりでなく包装容器を濡らすことが少なくなることから、段ボール強度の維持が可能であるとの報告もあり（Doung *et al.*, 2010a）、蒸散の抑制のみならず、積荷の荷崩れ防止にも効果的であることが示されている。

その他にも、吸湿液の調湿作用に着目した低温調湿庫についての報告もあり（長友ら, 2015；平ら, 2013）、低温庫を温度 $5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $95 \pm 0.5\%$ に制御可能など、近年は調湿を考慮した低温貯蔵庫の開発研究も盛んに行われている。

(5) エチレン除去技術

青果物の流通・貯蔵において品質を低下させる要因は

温湿度やガス組成、衝撃等数多くある。そのうちエチレンガスは青果物の生理活性を促す大きな要因のひとつであり、生産者や消費者の関心も高い。具体例として、バナナの黄化やカキの軟化、ブドウの脱粒等があげられ、商品価値の喪失につながる。流通・貯蔵では青果物自身から産生されるエチレンが庫内に蓄積されやすく、僅かな量でも生理反応が促されてしまう。しかしながら現状では出荷施設や卸売市場でのエチレン発生の多い品目とエチレン感受性の高い品目の同居は避けられないため、様々なエチレン除去装置が開発され施設等に設置されている。エチレン除去装置には紫外線照射によりオゾンを生じさせエチレンを酸化・除去するものや光触媒により酸化させるもの、コロナ放電により分解するもの、喚気によりエチレンを庫外に排出するものなどがある。前述の通り青果物の貯蔵等では多品目がひとつの庫内に同居する可能性が高く、エチレン感受性の高い青果物の品質を維持するためには庫内で発生するエチレンを速やかに除去する必要がある。一般に用いられる活性炭、ゼオライトなどの吸着剤では一定時間の使用の後、再生処理を施す必要がある。コロナ放電式分解装置は高電圧プラズマによりエチレンを炭酸ガスと水に分解しエチレンを除去するものである。本技術は高電圧電極と接地電極間の高電場内でパルス状放電によりプラズマを生じさせ、二次的に生じるオゾン、紫外線、窒素励起種によりエチレンの不活化を行う。また、本装置は庫内の殺菌にも利用される。構造が単純であり連続運転が可能のため取り扱いやすいが、副産物であるオゾンや一酸化炭素等有害物質の処理、高湿度での分解効率の向上が今後の課題となる（神原ら, 2017）。

(6) エチレン阻害剤燻蒸技術

植物成長調整剤として知られる 1-メチルシクロプロペン（1-MCP）は、植物体中のエチレン受容体と結合することによってエチレンの生理作用を阻害する。その結果として、処理した収穫後青果物の貯蔵性あるいは日持ち性が向上する効果を持つ。例えば、リンゴでは収穫直後～6 日後までの時期に濃度 1 ppm で 12～24 時間燻蒸暴露することにより果実の貯蔵性が向上、ナシやカキでは収穫直後～2 日後までの時期に濃度 0.5～1 ppm で 12～24 時間燻蒸暴露することによって日持ち性が向上することが認められている。農薬取締法に基づく新規の農薬登録申請に伴い、内閣府食品安全委員会において食品健康影響評価が行われ、ヒトの健康に影響を与える可能性は極めて低いとの結論が出されている。1-MCP は既に米国やカナダ、イギリス、中国を始め諸外国で広くその使用が認められている。図 10 は収穫直後のウメ（白加賀）を温度 25℃、1-MCP 濃度 1 ppm で 24 時間燻蒸暴露し、25℃で 1 週間貯蔵した際の X 線 CT 断面画像と外観であるが、1-MCP 処理したウメでは密度を表す HU 値分布が収穫直後と変わらないのに対し、無処理区では種子の周辺に HU 値の低い低密度域が広がることが分かる。このように 1-MCP 処理した青果物では内

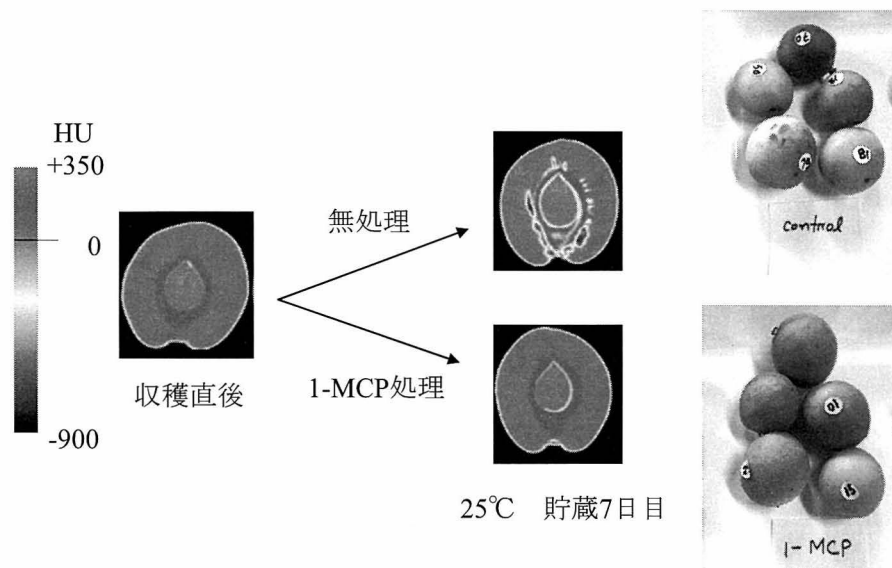


図10 無処理と1-MCP燻蒸処理を施したウメ果実のX線CT画像と外観

部組織や外観以外にも硬さ、水分等が保たれ、無処理区に比べ品質が保持されることが分かる。しかしながら、1-MCPの効果を引き出すためには、燻蒸時期に注意を払うこと、共選施設に低温庫以外の温度制御ができる気密性の高い暴露用の空間を設けることが必要である。また、施工サービス上の問題もあり十分な普及に至っていないが、国内外の青果物流通に大きな変化をもたらす潜在力を持っており、今後の動向が注目される。

数値流体解析による低温流通・貯蔵施設の設計・制御の最適化

1. 数値流体力学シミュレーションの利活用

数値流体力学（CFD：Computational Fluid Dynamics）解析とは流体の運動に関する支配方程式をコンピュータによって解き、流れを観察する手法である。最近、低温流通・貯蔵施設の設計・制御にも生かされはじめ、システムの最適化に寄与するようになってきている。解析技術とコンピュータ性能の飛躍的な向上により、流体の運動や熱移動、化学反応が同時に予測できるだけでなく、他のCAE（Computer Aided Engineering）モデルとの連成によってより複雑な諸物理現象を解析することも可能となっており、低温流通・貯蔵施設内の温度や風速

分布予測ばかりでなく（Nahor *et al.*, 2005, Verboven *et al.*, 2006, Tanaka *et al.*, 2012）、湿度やエチレン発生・分解（Umeno, 2016）、青果物燻蒸殺虫時のガス拡散（Delele *et al.*, 2012a, 2012b）をも予測可能としている。このように、CFD解析は、低温貯蔵を行う上で、「冷やす」機能の高度化に貢献する有用な技術である。

2. 低温庫内の風速・温度・湿度分布予測

図11にCFDシミュレーションにより可視化した積荷の無い状態での低温庫内における風速・温度・湿度分布の計算例を示す。本システムでは低温庫内部にナノミストを発生する調湿機を設置し、温湿度の同時制御を行っている。CFDシミュレーションから求めた風速分布の予測結果から冷風が庫内にムラ無く流れる様子が確認できる。温度分布についても冷凍機吹出口付近での温度がやや低くなるものの、流れにより全体的に均一化されている様子か示されている。相対湿度についても約90% RHで庫内が均一に維持されることが示されている。このように、CFDを利用することによって低温庫内の環境を容易に把握することが可能であり、積荷の冷却のされ方、青果物からの蒸散や呼吸、庫内での結露発生やその回避、冷凍機や送風ファン、除湿機の選定など低温庫の設計や制御、改良に幅広く利用され始めている。

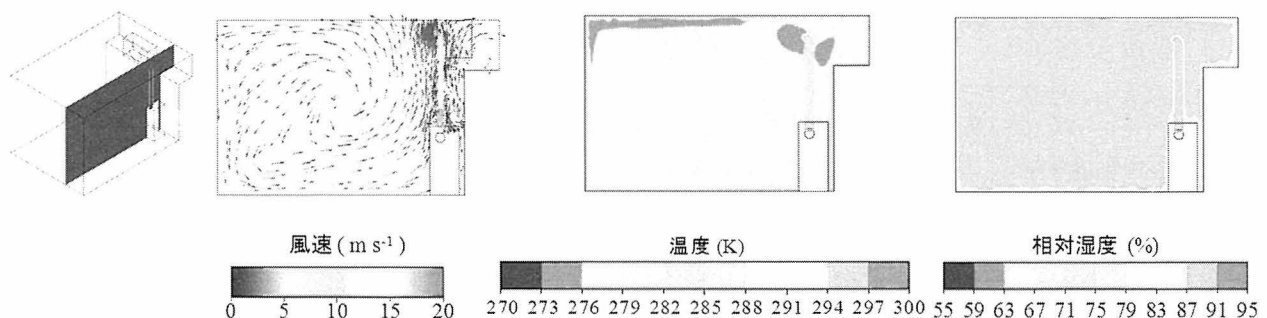


図11 CFDによる低温冷蔵庫内の風速・温度・相対湿度の可視化例

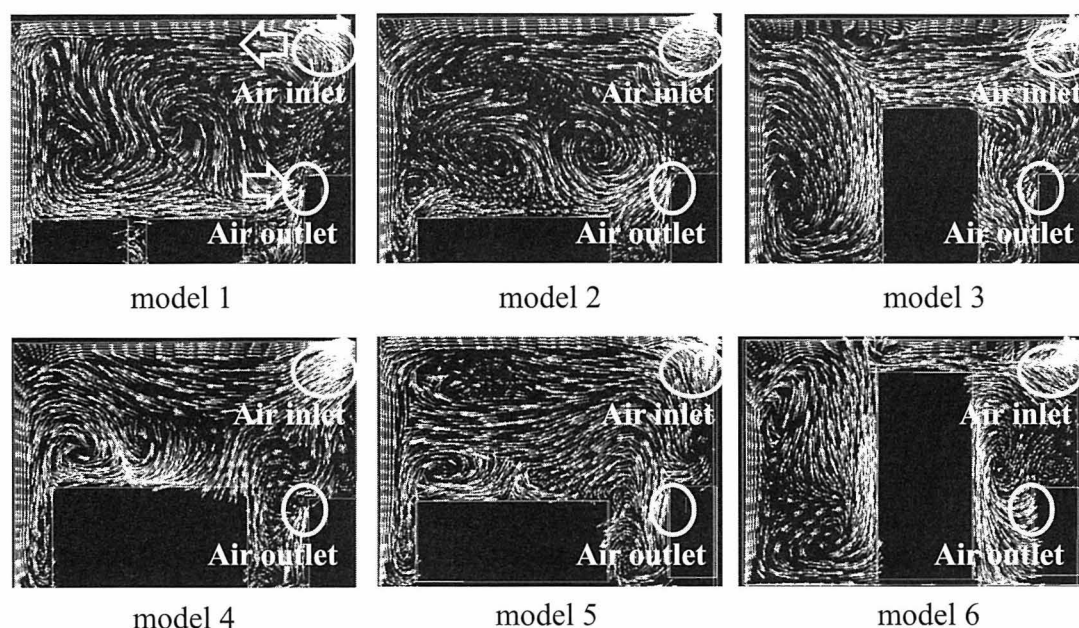


図 12 積付法の違いが気流分布に与える影響 (Tanaka *et al.*, 2012)

段ボール箱寸法：270 mm (幅) × 400 mm (長さ) × 225mm (高さ)

段ボール箱長さ方向と図の横方向が同じになるように積載

model 1：奥行，横，高さ方向に 2 個 × 2 個 × 2 個積んだ段ボール箱を間隔を空けて 4 セット積載

model 2：6 × 4 × 2；model 3：4 × 2 × 6；model 4：3 × 4 × 4；model 5：4 × 4 × 3；

model 6：3 × 2 × 8

3. 積荷の積付法の検討

CFD は低温庫内への積荷の積付けについても有益な情報を与える。Tanaka *et al.* (2012) は低温庫内に青果物積荷を模したペットボトル入り段ボール 48 個を 6 つの異なるパターンで積付けした際の庫内気流と積荷の冷却のされやすさを CFD 解析によって明らかにしている。図 12 に低温庫内に段ボール 48 個を 6 つのパターンで積付けしたときの低温庫内気流を，図 13 に初期積荷温度 30 °C を冷凍機からの冷風温度 2.1 °C で 27 時間後冷却したときの積荷平均温度と最大温度差を示す。これらの図

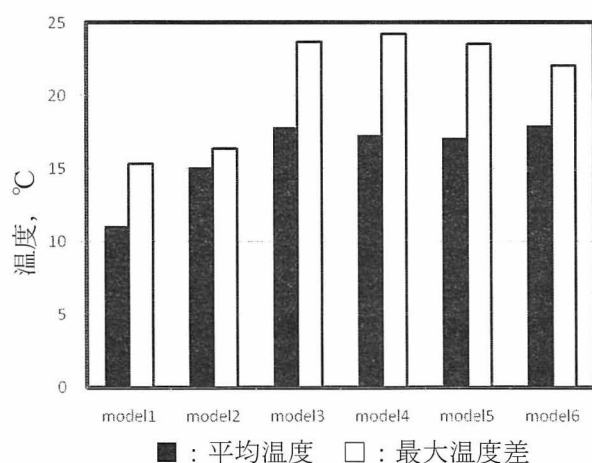
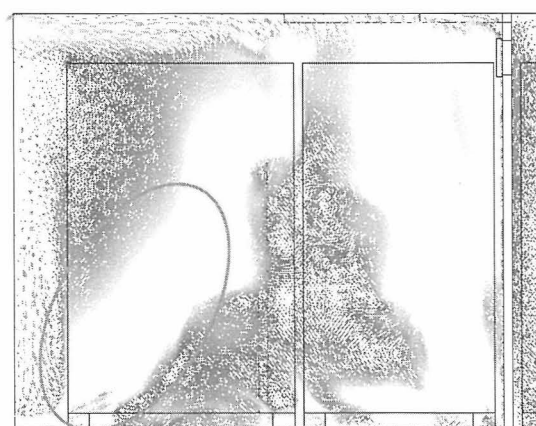


図 13 積付法の違いが積荷温度分布に与える影響
(初期積荷温度 30 °C，冷風温度 2.1 °C，27h 冷却後)
(Tanaka *et al.*, 2012)

から積付法の違いによって庫内気流と積荷の冷却速度が影響を受けることや段ボール間に隙間を設けることの効果が示されている。その他の計算例としては，図 14 に示すような冷凍機吹出口からの強い冷風が積荷に直接当たった様子を可視化した例もあり，積荷の位置によって過度な冷却や激しい蒸散が生じやすくなる可能性についても検討されている。

4. 低温庫内の化学種輸送

青果物の混載輸送用冷凍コンテナを設計する際の指針となる CFD 解析について解説する。本手法は低温貯蔵庫の設計・制御への応用も可能である。前述のように，青果物の輸出を促進するためには多品目の混載が避け



吹出口
図 14 冷凍機から吹出した冷風が積荷に直接当たる様子

られない。特に、エチレン生成量が多いリンゴとの混載では、エチレン感受性が高い品目の成熟を抑制するために、エチレンを除去する必要がある。低温貯蔵施設 2.2) (5) で解説したエチレン分解装置を冷凍コンテナに組み込み、CFD シミュレーションによってコンテナ内のエチレン発生と分解を予測した結果を図 15 に示す。本図はカキとリンゴの混載を想定した冷凍コンテナ庫内のエチレン濃度および風速分布を示した計算例であるが、リンゴ積荷から発生したエチレンがカキ積荷側に拡がって行く様子が示されている。コンテナの右上部にエチレン分解装置を設置しているが、この研究では、化学反応を伴う化学種輸送シミュレーションによってどの位置に分解装置を設置すべきかや各品目の積付位置、品目間に仕切板を設置した際の効果などについて検討し、設計・制御の最適化に資する成果を挙げている (Umeno, 2016)。

以上のように CFD 解析は青果物の低温流通・貯蔵の様々な場面に適用可能であり、フードチェーン全体の最適化を支える新たな技術として注目されて始めている。

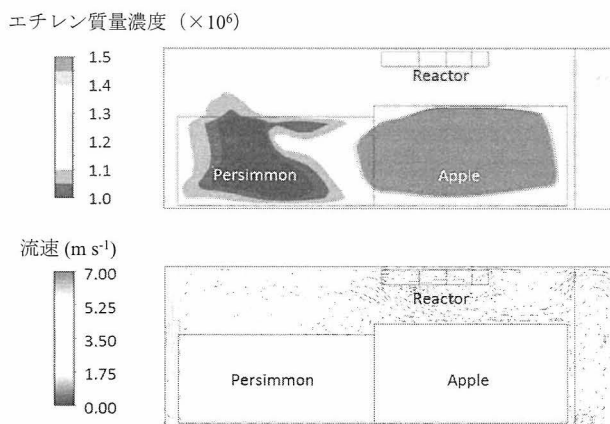


図 15 CFD による 20 ft リーファコンテナ庫内のエチレンと風速分布の可視化例

おわりに

冒頭で示したように、第 5 期科学技術基本計画 (2016 年 1 月閣議決定) では経済・社会的要請に対応すべき取組のひとつとして、スマート・フードチェーンシステムの確立があげられている。1965 年に出された「コールドチェーン勧告」に始まる我が国の低温流通・貯蔵技術の普及は青果物の広域流通を可能にしてきた。今後は、新技術の開発やこれまでに培った技術との統合による空調機能の高度化、さらには、物流に加え ICT による情報の流れを有効活用し、フードチェーン全体をスマート化して行くことが求められる。これにより、輸出にも対応可能な品質管理や鮮度保持、長期保存等の技術開発や環境負荷低減型の技術開発がよりスムーズに進むものと期待される。

謝辞

本稿の執筆に当たっては、鹿児島大学農学部食料環境

システム学研究室 (旧農産機械工学研究室) ならびに鹿児島大学元教授守田和夫氏 (故人) に写真等資料のご提供を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

引用文献

- 朝倉利員, 田中敬一 (1998): 冷温高湿貯蔵で果実の鮮度保持効果が従来の 5 倍, 農林水産技術研究ジャーナル, 22 (3), 21-24.
- Delele, M. A., Vorstermans, B., Creemers, P., Tsige, A. A., Tijssens, E., Schenk, A., Opara, U. L., Nicolai, B. M. and Verboven, P. (2012a): CFD model development and validation of a thermonebulisation fungicide fogging system for postharvest storage of fruit, *Journal of Food Engineering* 108(1), 59-68.
- Delele, M. A., Vorstermans, B., Creemers, P., Tsige, A. A., Tijssens, E., Schenk, A., Opara, U. L., Nicolai, B. M. and Verboven, P. (2012b): Investigating the performance of thermonebulisation fungicide fogging system for loaded fruit storage room using CFD model, *Journal of Food Engineering* 109(1), 87-97.
- 土居洋平 (2001): 食と農における新技術の導入過程—日本におけるコールドチェーン展開を事例として—, 慶応義塾大学大学院社会学研究科紀要 (社会学心理学教育学), 52, 17-25.
- Duong, H.V., Hamanaka, D., Tanaka, F. and Uchino, T. (2013): Particle size distribution of new type nanomist humidifier, *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 58(2), 365-370.
- Duong, H.V., Nakano, Y., Tanaka, F., Hamanaka, D. and Uchino, T. (2010a): Preserving the strength of corrugated cardboard under high humidity condition using nano-sized mists, *Composites Science and Technology*, 70(14), 2123-2127.
- Duong, H.V., Nakano, Y., Tong, S., Tanaka, F., Hamanaka, D. and Uchino, T. (2010b): Measurements of particle size distributions produced by humidifiers operating in high humidity storage environments, *Biosystems Engineering*, 107(1), 54-60.
- Duong, H.V., Tanaka, F., Uchino, T. and Hiruma, N. (2011a): Using nanomist humidifier to maintain postharvest quality of fig (*Ficus carica* L.) fruit in high humidity storage environment. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 56(2), 361-365.
- Duong, H.V., Tong, S., Tanaka, F., Yasunaga, E., Hamanaka, D., Hiruma, N. and Uchino, T. (2011b): Controlling the weight loss of fresh produce during postharvest storage under a nano-size mist environment. *Journal of Food Engineering*, 106(4), 325-330.
- 江嶋亜祐子, 法村奈保子, 馬場紀子, 塚崎守啓 (2016): フジコナカイガラムシ殺虫を目的とした高濃度炭酸ガス処理がカキ果実の品質に及ぼす影響, 福岡農林試研報, 2, 52-57.
- 早川 昭, 河野澄夫, 岩本睦夫, 小野寺武夫 (1983): 食総研報, 43, 109.
- 神原洋介, 内野敏剛, 田中史彦, 高木浩一, 高橋克幸, 塚崎守啓 (2017): コロナ放電による青果物由来エチレンの分解, 2017 年度農業施設学会大会講演要旨集, 75-76.
- 工藤亜義 (1982): リンゴの CA 貯蔵の現状と問題点, 日本食品工学会誌, 29 (7), 435-441.
- Lehmann, D.C. and Ferguson, J.E. (1984): A modified jacketed cold storage design, *International Journal of Refrigeration*, 7(3), 186-189.
- Mahajan, P.V., Oliveira, F.A. and Macedo, I. (2008): Effect of temperature and humidity on the transpiration rate of the whole mushrooms, *Journal of Food Engineering* 84, 281-288.
- 宮尾宗央 (2012): コールドチェーン高度化開発普及協議会～その

- 設立と活動成果について～, 冷凍, 87 (1011), 52-56.
- 長友優弥, 黒木 博, 平 栄蔵, 野口大介, 陰山 翼 (2015): 大型冷蔵施設及び冷蔵トラック用の低温調湿貯蔵装置の開発. <http://www.miyazakiu.ac.jp/crcweb/sangakuwp/wp-content/uploads/sangaku/4a0c5f0d116bdd4d93338f6ceeb42859.pdf>, (accessed 2018.1.1).
- Nahor, H. B., Hoang, M. L., Verboven, P., Baelmans, M. and Nicolai, B. M. (2005): CFD model of airflow, heat and mass transfer in cooling stores. *International Journal of Refrigeration* 28: 368-380.
- 法村奈保子, 江嶋亜祐子, 塚崎守啓, 馬場紀子, 中山 孝, 武田在満, 服部良隆, 田中史彦, 内野敏剛 (2016): 炭酸ガスと低温を組み合わせたカキ果実のフジコナカイガラムシ殺虫技術の開発, 福岡農林試研報, 2, 58-63.
- 農産物流通技術研究会編 (2011): 農産物流通技術 2011, 農産物流通技術研究会, 118.
- Paull, R.E. (1999): Effect of temperature and relative humidity on fresh commodity quality, *Postharvest Biology and Technology*, 15, 263-277.
- Rodov, V., Ben-Yehoshua, S., Aharoni, N., Cohen, S. (2010): Modified humidity packaging of fresh produce. *Horticultural Reviews*, 37, 281-329.
- 關屋まどか, 田中良奈, 田中史彦, 内野敏剛 (2017): 数値流体力学 (CFD) を用いた二温度帯コンテナ設計指針の検討, 2017 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, D132-1-5.
- 鈴木 徹 (2013): 低温流通とコールドチェーン, 冷凍空調便覧, IV 巻 食品・生物編 (日本冷凍空調学会編), 67.
- 平 栄蔵, 御手洗正文 (2013): 農産物用低温調湿庫の開発と実証実験. <http://www.miyazaki-u.ac.jp/crcweb/hpdata2010/sangaku/gijyutukenkyu/pdf/2013/B-1.pdf>, (accessed 2018.1.1).
- Tanaka, F., Cho, R., Hata, S., Tanaka, F., Miyamoto, S. and Uchino, T. (2016): Mortality modeling of adult *Tribolium confusum* (Jacquelin du Val) exposed to different concentrations of carbon dioxide in a mixture with nitrogen, *Journal of Stored Products Research*, 69, 113-118.
- Tanaka, F., Konishi, Y., Kuroki, Y., Hamanaka, D. and Uchino, T. (2012): The use of CFD to improve the performance of a partially loaded store, *Journal of Food Process Engineering*, 35(6), 874-880.
- 田中史彦, 田中俊一郎, 王世 清 (1999): 二元調湿換気式低温貯蔵庫内における温湿度予測に関する研究 (Ⅱ) —非定常から準定常運転時—, 農業施設, 29 (4), 175-180.
- 田中良奈, 關屋まどか, 田中史彦, 内野敏剛 (2017): CFD による船舶輸送用二温度帯コンテナの設計に関する研究, 農業食料工学会第 76 回年次大会講演要旨, 163.
- 田中敏一, 朝倉利員, 谷村泰宏 (1998): 低温高湿貯蔵の開拓, 冷熱輻射方式貯蔵庫, 負イオン/オゾン混合ガスによる果実の鮮度保持, 冷凍, 73 (843), 58-63.
- 樽谷隆之 (1963): 果実・野菜の貯蔵, 日本食品工学会誌, 10 (5), 186-202.
- 内野敏剛 (2013): 低温流通とコールドチェーン, 冷凍空調便覧, IV 巻 食品・生物編 (日本冷凍空調学会編), 367-368.
- Umeno, Y. (2016): CFD applications to advances preservation technique for agri-food products, Ph.D. dissertation at the Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University.
- Verboven, P., Flick, D., Nicolai, B. M. and Alvarez, G. (2006): Modelling transport phenomena in refrigerated food bulks, packaged and stacks: basics and advances, *International Journal of Refrigeration*, 29, 985-997.
- 王世 清, 田中俊一郎, 田中史彦, 守田和夫 (1997): 二元調湿換気式低温貯蔵庫内における温湿度予測に関する研究 (Ⅰ) —準定常運転時—, 農業施設, 28 (2), 77-85.

Recent Development in Research and Technology Related to Agricultural Facilities

—Cold Chain and Storage Facilities for Fruit and Vegetables—

Fumihiko TANAKA and Fumina TANAKA

Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka, Fukuoka 812-8581, Japan