

# 1. 農産物混載船舶輸送を可能とする 多温度帯コンテナの開発とその周辺技術

Development of Multi-Temperature Container and its Related Technologies for Mixed Freight of Agricultural Produces

キーワード：輸出促進，産地広域連携モデル，多温度帯コンテナ，クラウドシステム，スマートフードチェーン，数値流体力学解析 (CFD)  
Export promotion, Regional cooperation in agricultural production, Multi-temperature container, Cloud system, Smart food chain, Computational fluid dynamics (CFD)

田中 史彦 Fumihiko TANAKA 田中 良奈 Fumina TANAKA

## 1. はじめに

人口減少により日本国内の食市場が縮小する一方で、ASEANを中心としたアジア新興国では拡大する「中間所得層」「富裕層」の台動により食市場は急成長するものと見込まれることから、これらの市場に向けて日本産農産物や食品の輸出を一層促進していくことが期待されている。この達成のためには物流に係るインフラ整備はもとより、物流を最適化し利益をもたらすAI、IoTの利活用や食の安全を保障するブロックチェーンなど新たなクラウド技術を導入し、これまで以上に高度で強靱なグローバルフードチェーンシステムを構築することが重要となる。

本稿では、特に青果物の輸出促進のために我々が取り組んできた混載船舶輸送を可能とする多温度帯コンテナの開発について、その本体とこれに付随する周辺技術について紹介する。本研究は、生物系特定産業技術研究支援センター革新的技術開発・緊急展開事業（地域戦略プロジェクト、2016～2018年度）のうち「農産物輸出拡大にむけた産地広域連携モデルの構築と混載輸送用コンテナの開発（九州大学グループ）」に端を発するものである。アジアへの農産物輸出をターゲットとした九州3県（福岡、熊本、鹿児島）の広域連携出荷をモデルケースに想定し、これを効率的に集荷、計画的・安定的供給に努めるとともに、集めた農産物をその適正に合わせてコンテナにバンニングし、フードロスを抑えて輸送する高品質保持輸送システムを構築してきた。コンテナはSOC (Shipper's Own Container) となるため、通常の状態ではCOC (Carrier's Own Container) に比べ経済的なメリットは無いが、需給の不均衡が生じた場合にはコスト減に働くこともあり、また、コンテナの当たりはずれを心配する必要はないことから、高品質安定供給という観点から見ればコスト高も許容範囲に入るものと考えられる。何よりも輸出先国でコンテナのまま国内移動・保管でき

るメリットは大きい。さらに、帰国便について新たなビジネス展開ができればデメリットはさらに小さくなる。今後、消費者の信頼性や食品の安全性が益々重視されるようになる時代において、SOCのメリットはより見出しやすくなるものと期待する。新しい食品流通のインフラ“食品情報プラットフォーム”の構築が期待される今日において、世界ではすでに食品流通の標準化を視野に入れたソフト技術の開発競争が始まっていることから、管理のしやすい流通形態の展開への期待は大きい。

## 2. 農産物混載船舶輸送を可能とする 一貫体系技術開発

### 2.1 産地広域連携クラウドシステムの開発

農産物輸出の過渡期においては、一産地から長期安定的に一つの商品を集め輸出することは困難であり、広域連携して多品目を集め混載して輸出することとなる。輸出を目的とした生産体系が整えば20ftコンテナを満載にする量が比較的容易に集まり混載輸送は不要となるのかもしれないが、バイヤーが多品目購入を目的とする場合には将来的な需要も見込まれる。このことからNECソリューションイノベータ(株)を主体とし、産官学協力の下、九州3県の産地広域連携輸出を支援するクラウド型の需給マッチングオンデマンドエンジンを開発した(図1)。

このシステムは、現場生産履歴や季節ごとの生産量、品目の輸送適正カルテ、商談・調達コミュニケーション、混載パッケージ、集荷・出荷情報、輸送・積付計画、着荷検品、現地消費者アンケートなどの機能を有しており、流通中の温湿度・エチレン濃度・振動衝撃などの環境情報データも蓄積されている。本システムは今後の「農業DX構想」の推進にあたり、生産から消費に至るまでの各工程のIT利活用によるスマート化を進める契機となるとともに、現在断片的に存在するフードチェーン上のデータを川上から川下にまでつなげ、鮮度



図1 産地広域連携輸出クラウドシステムの概要

保持技術の向上や消費者の嗜好、販売データといった情報を生産現場にフィードバックし双方向でつなぐ、スマートフードチェーンの構築のキーテクノロジーとなることが期待される。流通技術の開発に従事する者としては、環境情報データから新たな付加価値を生み出すことは興味深く、輸送環境を整えて丁寧に輸送した商品については輸送品質を採点するなどの機能を付加したスマートコンテナ化を目指すのも面白い。

さて、本システムの機能のうち、最適冷蔵輸送に資するコンテンツは品目カルテである。現在、九州3県分のデータのみであるが、将来的には47都道府県の主要農産物を網羅したKRT47として広く普及することを願って止まない。この整備には大学や公設試、学会などが主導して取り組むことが強く望まれる。なお、この品目カルテの一部は、福岡県より「福岡県農林総合試験場輸出处向け農産物の品質保持手引き」としてネット上で公開されている<sup>1)</sup>。この手引きには果樹7種類17品目、野菜6種類8品目の輸送特性が掲載されており、最適輸送温度、呼吸量、低温障害の有無、エチレン発生量、エチレン感受性の有無、貯蔵後の棚もち試験など、輸送条件の検討に必要な特性調査結果が貯蔵後の外観品質写真とともに示されている(図2)。たとえば、カキ果実のうち富有では、輸送条件として0℃を推奨し、5℃では低温障害による軟化が顕著であること、無包装では果肉が

カキ「富有」	
最適輸送温度	0℃ (ポリエチレン個包装が必要)
輸送可能期間	20日間
低温障害	有 (5℃で顕著に品質低下) ※ポリエチレン個包装後、0℃で輸送すると低温障害の発生を抑えることができます
エチレン発生	無
エチレン感受性	大
留意点	・ポリエチレン袋のまま販売してください ・着色度が低い果実の方が日持ちします ・エチレンを発生する品目の混載は避けてください

輸送特性情報 (まとめ)

包装条件	貯蔵温度	貯蔵性 (20日貯蔵後の品質)			呼吸量 (CO <sub>2</sub> mg/kg/h)	エチレン発生量 (μL/kg/h)	エチレン感受性	
		低温障害	出庫時	棚3日			棚5日	1ppm
無包装	0℃	有	○	△	2.2	0.0	無	小
	5℃	有	×	×	4.9	0.0	中	大
	10℃	無	×	×	6.4	0.0	大	大
PE 個包装	0℃	無	○	○			無	無
	5℃	有	△	×			中	中
	10℃	無	×	×			中	大

注) PE: 60μm ポリエチレン, 斜線: 未実施

1) 貯蔵温度および包装に関する試験結果

貯蔵温度が果肉硬度に及ぼす影響

貯蔵温度	試験開始時	果肉硬度 (kg)								
		出庫直後			棚3日			棚5日		
		無包装	PE	t 検定	無包装	PE	t 検定	無包装	PE	t 検定
0℃		1.21	1.19	ns	0.41	0.83	ns	0.67	0.99	ns
5℃	1.30	0.38	0.77	ns	0.08	0.29	ns	0.12	0.53	*
10℃		0.01	0.32	*	0.00	0.13	*	0.00	0.16	ns

注) 品質保持の目安: 果肉硬度 0.80kg 以上

図2 品目カルテ (品目特性情報) 例

軟化しやすいため PE 個包装を行う必要があり、そうすれば0℃で20日間冷蔵(輸送)後、店頭での販売を想定した20℃で5日間の棚もち試験でも、その硬度が保持され商品価値を失わないことが示されている。ナスについては、0℃と5℃で低温障害が発生し、またエチレン障害も受けやすいため、10℃で輸送すること、ただし輸送可能期間は10日程度、棚成ちは3日程度が限界と記されている。個票の見方や貯蔵条件、調査方法品質評価基準などと併せ参照されたい。このように、クラウドシステムの中には低温輸送に役立つ技術的な情報も含まれており、この誌面をお借りしてご案内させていただきたい。輸出ではこのカルテの手引きに従い、混載コンテナへバンニングすることとなる。農産物の特性は様々であり、混載輸送・貯蔵が難しい所以である。さらに、積み付け位置によって輸送環境が異なるため、我々は食品ロスの低減を目指し、コンテナ内のハザードマップ(結露が生じやすい箇所や冷えすぎたり冷えにくかったりする箇所など、ある品目にとっては危険と判断される箇所を可視化)をCFD(Computational Fluid Dynamics)解析によって作成中であり、本システムの輸送・積付計画機能の高度化を目指しているところである。



## 2.2 多温度帯コンテナの開発

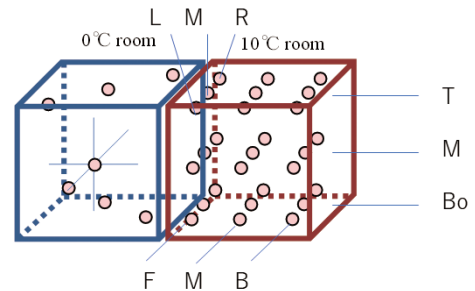
農産物混載船舶輸送を可能とする一貫体系のメイン技術となる多温度帯コンテナは、図3に示すとおり20ftリーファーコンテナ庫内を中扉によって前後に二分割し、冷凍機側を低温室(0℃)、扉側を高温室(10℃)として両者間の隔壁に送風ファンとリターン口を設けた構造になっている。高温室側天井にはエチレン除去のためのプ



図3 多温度帯コンテナの外観および内部の様子

ラズマ分解装置とヒーター内蔵型庫内循環ファンが設置されている。図4に内部構造と研究の概要を示す。本機的设计・製造は共同研究機関であった(株)デンソーによる。起動後は冷凍機で冷やされた空気が低温室前方(冷凍機側)の下部にある吹出口から出て低温室内を冷やすとともに、冷蔵ファン付ダクトから高温室側に流れ所定の室温に調節、その後、リターン口から低温室側に戻る仕組みとなっている。安定運転時は冷蔵ファンを停止し、壁面に設けた温度コントロールファンのオン・オフ制御によって少量の冷風が高温室側に送られることになる。図4に示すとおり、本機的设计は主にCFD解析によって行い、空コンテナ内の温度を低温室 $0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、高温室 $10 \pm 2^\circ\text{C}$ で制御することを目標とした。

改良前のプロトタイプモデルについてはあるが、図5に夏期条件(外気温 $38^\circ\text{C}$ )における高温室27箇所の温度の実測値と予測値を示す<sup>2)</sup>。左列に冷蔵ファン稼



### 多温度帯コンテナの開発

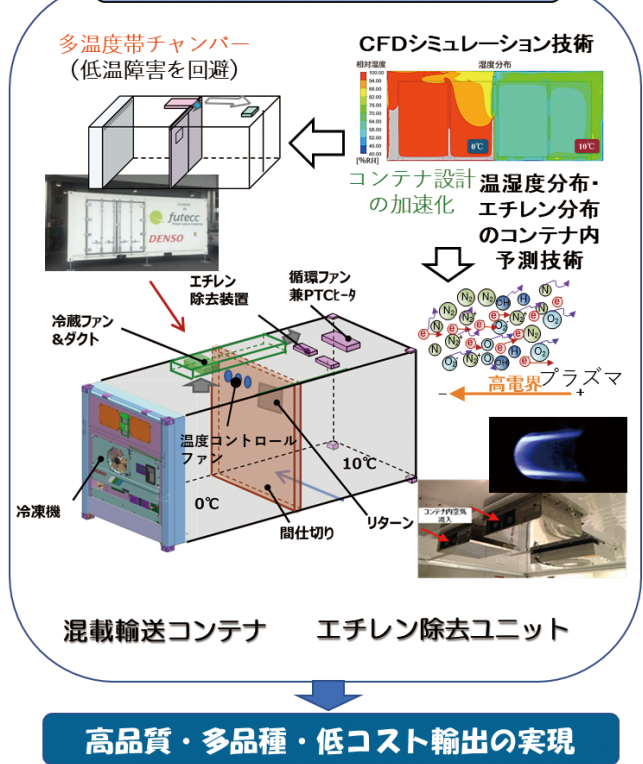
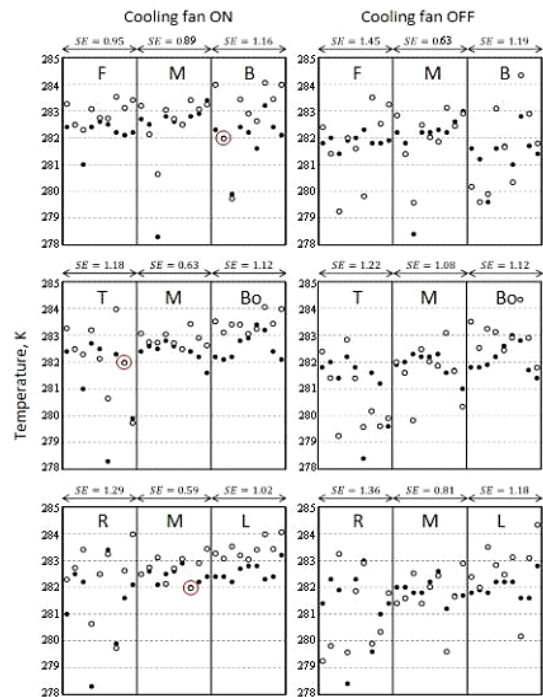


図4 多温度帯コンテナ開発研究の概要



F: 前方, M: 中間, B: 後方, T: 上方, Bo: 下方, R: 右, L: 左  
 ◎: 温度制御点 (282 K に到達したら温度コントロールファインを切る)  
 ●: 測定値, ○: 予測値

図5 高温庫(10℃)内の温度予測結果と実験結果の比較

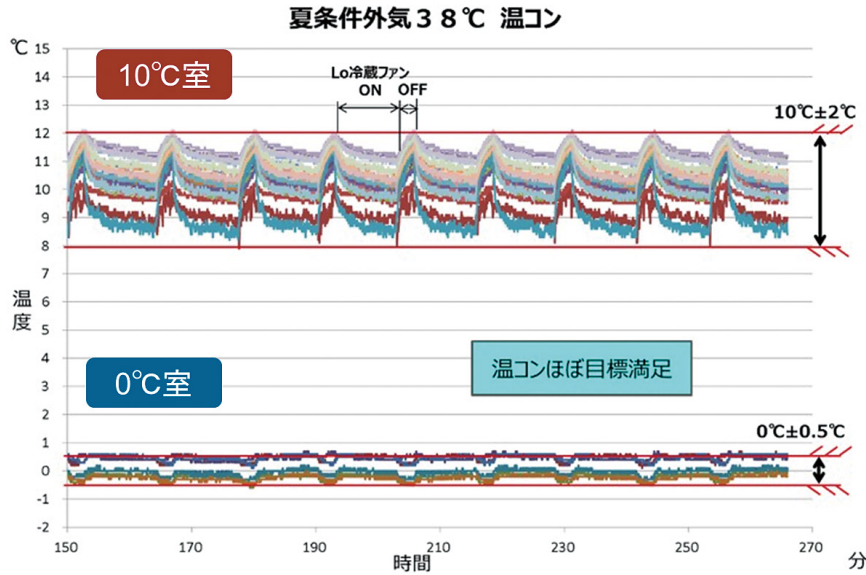


図6 多温度帯コンテナ内の温度制御結果

働直後の、右列に冷蔵ファン停止直前の場所ごとに区分けした分布図を標準誤差とともに示す。冷蔵ファン稼働直後については、基準計測点(◎)の実測値と予測値が $-1^{\circ}\text{C}$ に達した時点における温度分布を比較した。この結果、実測値と予測値の標準誤差(一致性の指標)は $1.0^{\circ}\text{C}$ 、27点の標準偏差(ばらつきの指標)は実測値で $1.0^{\circ}\text{C}$ 、予測値で $0.9^{\circ}\text{C}$ となり、冷蔵ファン稼働直後における実現象とシミュレーション上の温度のばらつきの程度は近いと結論づけた。続いて、冷蔵ファンの稼働が停止する直前の実測値と予測値を比較したところ、標準誤差は $1.1^{\circ}\text{C}$ 、27点の標準偏差は実測値で $0.9^{\circ}\text{C}$ 、予測値で $1.4^{\circ}\text{C}$ という数値が得られ、稼働直後と比較して予測値の温度のばらつきの程度が大きくなった。また、場所ごとに算出した標準誤差について、 $10^{\circ}\text{C}$ 室間仕切側(前方向)、天井付近(上方向)およびダクト延長線上(右方向)の値が他の場所よりも大きくなる傾向がみられたが、両者とも誤差は約 $1^{\circ}\text{C}$ と良好な精度が得られた。また、 $0^{\circ}\text{C}$ 室の9点における標準誤差は小さく、ファン稼働・停止直後でも $0.5^{\circ}\text{C}$ 以下、標準偏差はともに $0.2^{\circ}\text{C}$ となった。以上の結果から、本モデルの妥当性が検証された。前後するが、このモデルを基礎として改良を重ね実用化したのが先の図4にある装置である。改良の結果、図6に示す性能試験の結果のとおり、夏条件下でも両庫内とも目標変動幅内の温度制御が可能であった。香港やシンガポールへの輸送実証試験にはこの改良型コンテナを用いて実施した。同機にはプラズマ分解によるエチレン除去装置が装備されており、海外への輸送実証試験では庫内エチレン濃度は $1\text{ ppm}$ 台に抑えることが可能である。なお、現時点ではパイロダクトである一酸化炭素やオゾンの発生が微量ではあるが認められるため、引

き続き電圧や流量の制御などによってこれらの発生を抑える研究が岩手大学高木教授らのグループにより進められている。CFD解析では、農産物からのエチレン発生、庫内移動と除去装置による分解を含む化学種輸送シミュレーションも行い、エチレン発生源となる積荷を分解装置の手前に置くことでコンテナ後方上部にエチレン濃度の低い箇所が確保できることを明らかにした<sup>3)</sup>。

この改良型の多温度帯コンテナ(低温室 $1^{\circ}\text{C}$ 、高温室 $10^{\circ}\text{C}$ 設定)と通常リーファーコンテナ( $5^{\circ}\text{C}$ 設定)を用い、博多から香港へ青果物を輸送した。コンテナに積載されてから香港に到着するまで約1週間、それぞれの設定温度条件下で輸送され、その後棚もち期間を想定して $20^{\circ}\text{C}$ にて2日間保管した上で品質調査を行った。輸送品目は福岡、熊本、鹿児島県の3県で生産されたナス、キュウリ、レタス、チンゲンサイ、カキ、モモ、ブドウ、ミカンなど30品目以上で、夏季と冬季を想定して6月と12月の2回実施した。特筆すべき結果としては、通常コンテナ( $5^{\circ}\text{C}$ )で輸送したナスは低温障害により種子や果肉の褐変が見られたが、多温度コンテナ( $10^{\circ}\text{C}$ )では低温障害は見られなかった点が挙げられる。また、キュウリについても同様に通常コンテナ( $5^{\circ}\text{C}$ )では果肉の褐変が認められ、低温障害の抑制効果が確認された。他については誌面の都合で詳細は省くが、青果物ごとに適した温度で輸送することにより、多くの品目でロス率は低くなった。また、25人のパネラーによる総合評価(商品性の評価)も良好であり、輸送中の食品ロス削減につながるが示された。冬季を想定して、2月に別途行ったシンガポールへの輸送実証試験においても、イチゴを空輸(常温輸送、福岡空港からシンガポールには翌日着)と船舶輸送( $0^{\circ}\text{C}$ 輸送、博多港からシンガポール



まで12日間)で送った際の現地消費者アンケートを実施し、船便でも遜色なく受け入れられることを明らかにした。

本コンテナは氷点以下の冷凍コンテナとしても使用でき、性能試験によって冷凍(-20℃)と冷蔵(0℃)の二温度帯での運用も検証されたことから、冷凍食品から生鮮青果物に至るまで幅広く対応が可能である。このユーティリティの高さから多様な輸送パッケージが設計でき、バイヤーの様々な要求にも応え得る仕様となっているため販路の拡大が期待できる。

さらなる展開としては、庫内輸送環境データから流通中の品質変化を予測するフードシミュレータによって、商品がどのような流通品質(温湿度やエチレングス濃度、振動などの特性に由来する)で輸送され、そのために商品の品質はどのように変化し得るかを簡単に評価できる機能を付加し、一般に普及している自動車ドライバーの運転診断のように、食品流通を何らかの方法で診断することによって改善策を見出し、流通そのものの高品質化を図ればと考える。先に記したクラウドシステムとの連携も視野に入れ、今後は現在収集可能な産地情報や現地消費者情報(品質評価、客層、購買意欲等情報)などと各種センサによる流通環境情報を紐づけることで、種々の情報から予測を行うシミュレータまでを一元管理し、新たな価値を創出、クラウドシステムの下にリアルで動くスマートコンテナへの展開も期待したい。

### 3. おわりに

本稿では、農産物および食品の輸出を促進する一貫体系技術として、産地広域連携モデルの構築と混載輸送用コンテナの開発について紹介してきた。産地広域連携を支援するクラウドシステムが新たに開発した混載輸送用コンテナを駆動し、より効率的な運用を可能とする取り組みである。今後、農産物および食品の輸出促進と新展開のためには、ハード技術の高度化はもとよりソフト技術、延いてはサイバー技術との融合によって新たな価値が創出されることが期待されている。デジタルツインなどに見られる現実空間とサイバー空間の接続やブロックチェーンによる食の安全性の保障など様々な技術が開発され、データ駆動型の輸出促進も叫ばれるようになってきた。食のトレーサビリティは川下側の消費者、それに直接対応する小売業者などからの要求は大きいものの、データ入力の煩わしさや導入コストの問題があり、利便

性や付加価値の創出など大きなメリットが認められない限り実装化は難しいが、一方で、「企業がテクノロジー(IT)を利用して事業の業績や対象範囲を根底から変化させる」というDX推進の動きも見られることから、今回紹介した一貫体系技術が核となり、生産者から消費者まで様々なメリットがもたらされる豊かなグローバル流通の発展の一助になればと願う。

### 謝 辞

本成果の一部は、生物系特定産業技術研究支援センター革新的技術開発・緊急展開事業(うち地域戦略プロジェクト)により実施し、岩手大学、福岡県農林業総合試験場、熊本県農業研究センター、鹿児島県大隅加工技術研究センター、(株)デンソー、NECソリューションイノベータ(株)、西日本鉄道(株)、九州農産物通商(株)、筑前あさくら農業協同組合、八代地域農業協同組合、いぶすき農業協同組合他の協力の下に遂行されたものである。ここに記して感謝の意を表する。

### 文 献

- 1) <http://farc.pref.fukuoka.jp/fukyu/yusoutokusei.html> (2021).
- 2) 關屋まどか, 田中良奈, 田中史彦, 内野敏剛, 藤田明, 加藤信治, 谷口雅巳: 冷空論, **35** (3), 211 (2018).
- 3) 田中良奈, 關屋まどか, 田中史彦: 農業環境工学関連5学会2018年合同大会講演要旨集, OS-9-2, 松山市 (2018.9).



田中 史彦 Fumihiko TANAKA

九州大学大学院博士後期課程修了  
九州大学大学院農学研究院  
Kyushu University  
教授



田中 良奈 Fumina TANAKA

九州大学大学院修士課程修了  
九州大学大学院農学研究院  
Kyushu University  
助教

原稿受理 2021年8月24日