

# 最適貯蔵温度の異なる青果物の混載輸送を可能とする 二温度帯コンテナの開発

田中 良奈<sup>1</sup>・田中 史彦<sup>2</sup>

国立大学法人九州大学 大学院農学研究院 環境農学部門 農産食料流通工学研究室 助教<sup>1</sup>・教授<sup>2</sup>

## 1. はじめに

農林水産省は農林水産物・食品の輸出額を2030年までに5兆円規模へ拡大することを目標としており<sup>1)</sup>、米や青果物、茶、畜産物、水産物などについて品目別の輸出力強化に向けた対応方向を策定し、アジアを中心とした市場の拡大が見込まれる地域へ輸出することでその達成を目指している。これまでの青果物の輸出は、鮮度保持の関係で航空輸送が中心であり、輸出可能な品目は高級品に限られていた。しかし、輸出拡大にあたり、船舶による多品目の低価格大量輸送が注目されている。ここで、船舶による青果物の輸送を行うにあたり、多品目の混載および長期間の鮮度保持が必要となるが、青果物の最適貯蔵温度は品目ごとに異なる<sup>2)</sup>ため、コンテナ庫内に複数の温度帯を設ける必要がある。よって、本研究では、最適貯蔵温度の異なる青果物の混載輸送を可能とする二温度帯コンテナの開発を目的として数値流体力学(CFD)を用いた熱流体解析を行い、コンテナ内部の温湿度・風速の時空間分布を予測・可視化し、最適な空調設計指針について検討した。また、その結果を用いて実際にコンテナを作製し、海外への輸送試験を行ったので、それらの結果についても最後に一部紹介したい。

## 2. 材料および方法

### 2-1 解析モデル

本研究では、20 ftのリーファーコンテナを基に二温度帯コンテナの開発を試みた。コンテナ内に荷積み

行っていない空コンテナ(以下、モデル1)と、荷積みを行ったコンテナ(以下、モデル2)の二つのジオメトリを作成した。

図1に空コンテナの解析モデル(モデル1)を示す。断熱性のある間仕切りを用いてそれぞれ0℃および10℃を目標温度とする二つの部屋を設け、冷凍機側の部屋を0℃室、もう一方の部屋を10℃室とした。0℃室の天井には冷蔵ファンならびにダクトを設置し、10℃室内には温度むら改善のための循環ファンと低外気温時に稼働する加温ヒーターを追加した。

庫内の空気流れは、冷却された空気が冷凍機吹出口から0℃室庫内に流入した後、同室に据え付けた冷蔵ファンおよびダクトを経由して10℃室へ流れ、二室を繋ぐリターン口を通して0℃室へ戻ることとなる。また、0℃室冷凍機側上方には冷凍機の吸込口が配された構造となっている。

次に、積荷を行ったコンテナの解析モデル(モデル2)を図2に示す。図1と同様のジオメトリに積載物を模したジオメトリを追加した。積荷間に0.05 mの隙間を設け、0℃室、10℃室にそれぞれ4個積載した。

モデル1、2共に、リターン口の開口部を上側あるいは下側に設計したモデルをそれぞれ作成し、開口部の位置の違いが庫内の空調および積荷に与える影響について検討した。図3に開口部の設計案を示す。

### 2-2 解析条件

作成した解析モデルについて、ソフトウェアANSYS Fluent 17.1(ANSYS、米)を用いて数値解析を行った。表1に解析条件を示す。冷凍機吹出口空気温度は0℃

とし、 $10.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ でコンテナ庫内の $0^\circ\text{C}$ 室側に流入させた。冷蔵ファンおよび循環ファンの吹出風速は、ダクトを通過する過程で圧力上昇が起こるとする仮想のファン境界条件を設け、実測値に一致させた。加えて、間仕

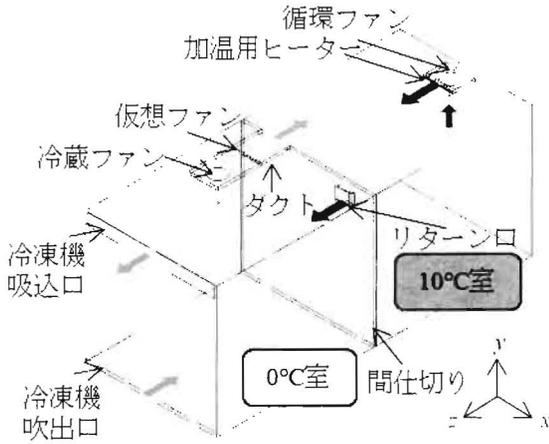


図1 空コンテナの解析モデル (モデル1)

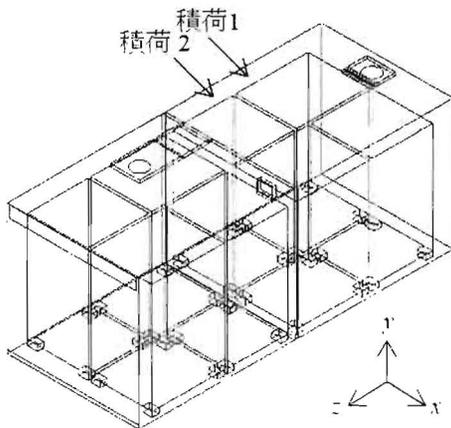


図2 荷積みコンテナの解析モデル (モデル2)

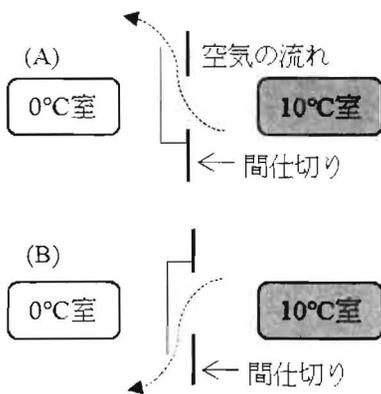


図3 リターン口開口部の設計案  
A: 上側開口 B: 下側開口

切りの物性値とコンテナ外壁の熱貫流率データ (株式会社デンソー提供) を組み込み、外気温度は夏期および冬期における海上輸送を再現して $38^\circ\text{C}$ あるいは $0^\circ\text{C}$ に設定した。以降、前者を夏期条件、後者を冬期条件とする。初期条件は $t=0 \text{ s}$ においてコンテナ内の空気の温度を $10^\circ\text{C}$ 、 $0^\circ\text{C}$ とし、非定常乱流条件で解析を実行した。なお、積載物は多孔質媒体とし、各物性値はTanakaら (2012)<sup>3)</sup> の研究を参考に設定した。

表1 解析条件

解析タイプ		非定常
乱流モデル		標準 $k-\epsilon$
冷凍機吹出口	温度	$273 \text{ K}$
	速度	$10.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
冷蔵ファン 循環ファン	圧力上昇値	$110 \text{ Pa} / 0 \text{ Pa}$ $25 \text{ Pa}$
加温ヒーター		$0 \text{ W} / 300 \text{ W}$
外壁	熱貫流率	$0.39 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
	外気温度	$311 \text{ K} / 273 \text{ K}$
間仕切り	密度	$30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
	比熱	$1500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
	熱伝導率	$0.028 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
空気	初期温度	$283 \text{ K} / 273 \text{ K}$

### 3. 結果および考察

#### 3-1 空コンテナ (モデル1)

二温度帯コンテナの熱流体解析により、夏期条件では冷凍機吹出口から流入した空気は床に沿って流れ、間仕切り壁に沿って上昇した後、 $0^\circ\text{C}$ 室に設置された冷蔵ファンとダクトを通じて $10^\circ\text{C}$ 室に流入し、冷気が室内に広がる様子が確認された (図4 (a), (b))。また、冬期条件にて冷蔵ファンの稼働を停止した条件を組み込んだところ、加温ヒーターによって暖められた空気が $10^\circ\text{C}$ 室天井に取り付けた循環ファンから吹き出し、同室内の天井面、間仕切り、床面を暖めながら循環する様子が見られた (図4 (c), (d))。なお、図4はリターン口が上向きの場合の結果であるが、下向きの場合も前述と同様の結果が得られた。

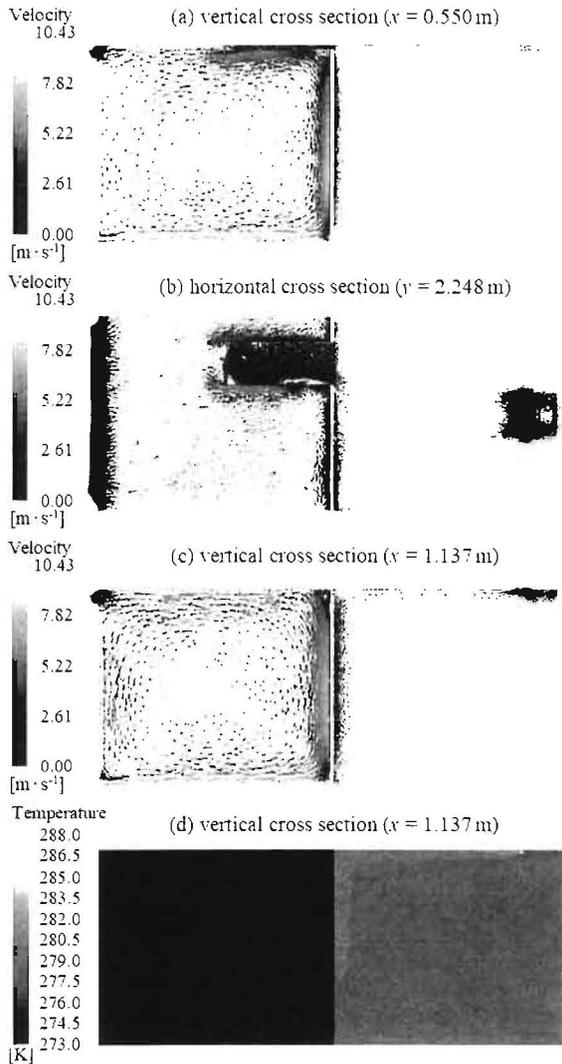


図4 コンテナ内の速度分布および温度分布

((a) および (b) : ダクト付近および天井付近段面における速度分布、(c) および (d) : コンテナ中央断面の速度分布および温度分布)

図5に夏期条件における解析時間10分後のリターン口付近の速度分布図を示す。リターン口の開口部を上部に設計した場合、10℃室から0℃室へ流入した空気は天井に沿って流れるが、下部に設定した場合、冷凍機からの風と衝突する様子が確認された。

リターン口が上向きの場合、空気の温度差が駆動力となって0℃室から10℃室へ冷気が流入すると予想されたが、速度分布図を可視化したところリターン口を通じた冷気の流入はほとんど見られなかった。10℃室から0℃室へ流れる上向き風速が大きかったため、

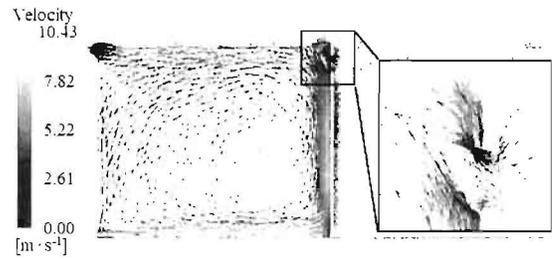


図5 冷蔵ファン稼働時のリターン口付近速度分布

自然対流による冷気の移動が生じなかったと考える。一方、リターン口の開口部を下部に設計した場合、間仕切り壁に沿って上昇した冷凍機吹出口からの冷気がリターン口を通じて10℃室へ流入することが明らかとなった。

以上の結果から、リターン口の向きについては上向きが望ましいと言える。ただし、積荷への影響も確認する必要があることから、開口位置の設計については次節の荷積みを行ったコンテナの結果も踏まえて再検討することとした。

### 3-2 荷積みコンテナ (モデル2)

図6に解析時間10分後のダクト付近の温度分布図を示す。0℃室の空気がダクトを經由して10℃室へ流入する様子が確認され、10℃室内の積載物上部に約3~6℃の冷気が接触することが明らかとなった。10℃室内に搬入される青果物の中には低温障害を引き起こす品目も含まれ得るため、その防止策として冷気が10℃室内に分散しやすいよう、ダクトを延長し、ダクト出口を循環ファンに近づける等の改善が求められる。

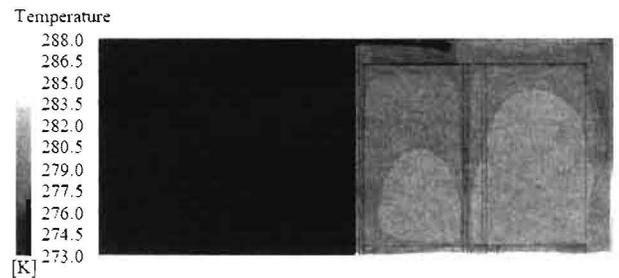


図6 ダクト付近の温度分布

図7に夏期条件における解析時間10分後のリターン口付近の温度分布図を示す。リターン口開口部を下側

に設けた場合、0℃室の積荷に約4.5~6℃の空気が接触することが明らかとなった。積荷との接触部分で生じた水滴により積荷が濡れる可能性が高く、庫内に段ボール箱を積載すると濡れによる強度の低下<sup>4)</sup>のため荷崩れを引き起こす原因になり得る。一方、リターン口の開口部を上側に設けた場合、10℃室の空気が0℃室の積荷に接触せず間仕切りに沿って天井に向かう様子が確認され、0℃室の天井を濡らす可能性が示された。

荷崩れの可能性を考慮し、本研究ではリターン口の開口部は上向き設計が適当であると結論づけた。

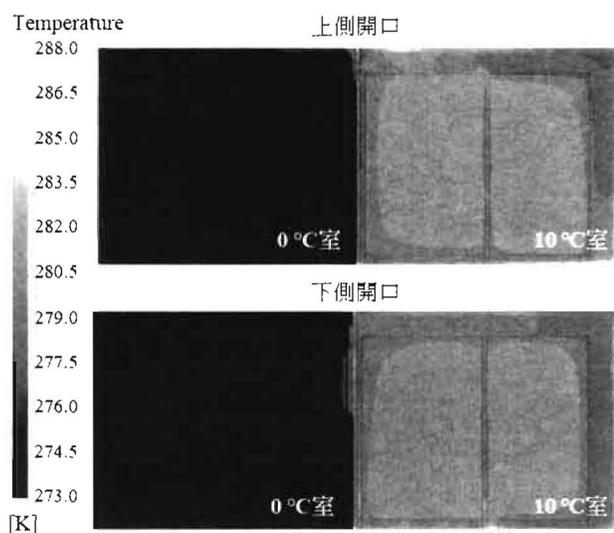


図7 リターン口付近の温度分布

#### 4. おわりに

本研究により設計指針を検討した結果、10℃室における低温障害を防止する観点からダクト出口を10℃室内部に設置すること、積み荷への結露防止の観点からリターン口の開口部を上向きに設置することが望ましいことが示された。

この結果を基に実証用コンテナを作製(図8)し、青果物を積載して香港への輸送試験を行った。輸送中の温湿度は安定しており、目標とする10℃±2℃の温度範囲内に保たれたことが確認された。

多温度帯の普及を目指し、現在、設定可能温度帯の拡張に挑戦している。具体的には、冷凍・冷蔵コンテナとしての使用を目指し、各種送風機の風量や間仕切りの構造等最適な設計について検討している。青果物

の混載輸送に加え、冷凍食品と青果物の混載が可能となることで、二温度帯コンテナの利用可能性が広がることを期待する。



図8 開発したコンテナ

最後に、本研究が革新的技術開発・緊急展開事業うち地域戦略プロジェクト「グローバルコールドチェーン・混載輸出コンソーシアム 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(課題番号:16803319)」の助成を受けたものであることを記し、謝意を表す。また、本成果の一部は日本冷凍空調学会論文集<sup>5)</sup>にて公表済みである。

#### 引用文献

- 1) 農林水産省, 農林水産業の輸出力強化戦略について. <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/nousui/pdf/nousui1.pdf> (2020年3月6日確認).
- 2) 邨田 卓夫, 青果物の低温流通と低温障害, コールドチェーン研究, 6(2), 42-51, 1980.
- 3) Tanaka, F., Konishi, Y., Kuroki, Y., Hamanaka, D., Uchino, T. The use of CFD to improve the performance of a partially loaded store., Journal of Food Process Engineering, 35(6), 874-880, 2012.
- 4) 内野敏剛, 農産物・食品の安全と品質の確保技術(第13回), 農業食料工学会誌, 77(6), 426-430. 2015.
- 5) 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, 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, 日本冷凍空調学会論文集, 35(3), 211-218, 2018.