

# 解 説

## 農産物・食品の安全と品質の確保技術 (第14回) — CFD/CAE アプローチによるポストハーベストシステムの最適化 —

Techniques for Ensuring the Safety and Quality of Food and Agricultural Products (Part 14)  
— CFD (Computational Fluid Dynamics)/CAE (Computer Aided Engineering)  
Applications to Characterize and Design Postharvest Systems —

**キーワード**： 数値流体力学, 計算機支援工学, モデリング, マルチフィジックス, マルチスケール, 最適化  
**Keywords**： Computational Fluid Dynamics, Computer Aided Engineering, modeling, multi-physics, multi-scale, optimization

### 1. はじめに

CFD (Computational Fluid Dynamics) 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。本来、流体自体ならびにその中に置かれた物体周りの流れを知ることが目的としたが、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、さらには他の 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マルチフィジックス・シミュレーションも可能となっている。工業分野における CFD 技術応用の歴史は古く、1960年代には航空業界で航空機やエンジンの設計に利用され、船舶や発電所、化学プロセス、空調などの制御・設計、気象予測などその応用は多岐に亘っている。農業分野では、温室 (趙ら, 2005) や貯蔵施設 (Nahor et al., 2005; Tanaka et al., 2012; Umeno et al., 2015), 乾燥施設 (田中ら, 2001), 畜産施設 (Ikeguchi, 1990; Sun et al., 2000; 星ら, 2002a, 2002b), 冷凍車 (Moureha and Flick, 2004; 小西ら, 2009), 包装容器 (Kitazawa et al., 2012) を対象とした研究事例もある。また、農産物・食品の腐敗防止と安全確保の観点から、電磁波照射による殺菌予測を行った例も報告されている (Tanaka et al., 2007; Trivittayasil et al., 2011; Tanaka et al., 2012)。青果物内部の熱・物質移動特性を解析した報告 (Rezagah et al., 2013a, b, 2014) や細胞組織レベルにおいてガス拡散を予測するモデルについての報告もあり (Ho et al., 2011), CFD によるアプローチは細胞組織を対象としたマイクロスケールから大規模施設の設計に至るまで、幅広く活用されている。この手法はあらゆるスケールに適用可能なことから、著者らは各レベルでの現象解析とその統合を目指す研究を遂行している。図1に著者が遂行中のマルチスケール・シミュレーション研究について、その概略を示す。本研究はナノスケールから施設スケールに至るまでの CFD (CAE を含む) シミュレーションを実行し、諸特性の推算やシステ

田中史彦

(たなか ふみひこ)

1966年5月生

1996年鹿児島大学農学部助手、助教授を経て、

現在、九州大学大学院農学研究院 准教授

農業食料工学会正会員, 評議員

E-mail: fumit@bpes.kyushu-u.ac.jp



ムの最適化を目指すものである。この系で起こる諸現象をマルチフィジックス・モデルによって予測することで、より現実的なシミュレーションを可能にしている。各ス

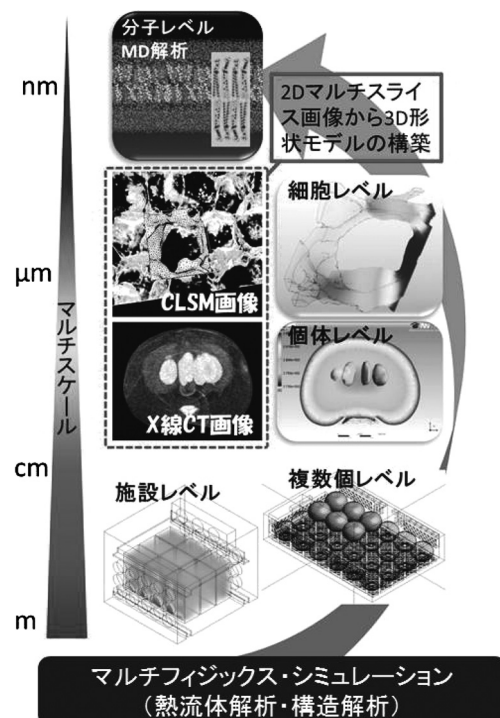


図1 マルチスケール・シミュレーションの概要

ケール間での情報共有，例えば，細胞スケールで熱解析を行い，そこで得られた温度場データをナノスケールにおける細胞膜の動的挙動解析に生かすなど相互間の連成も期待される。特に，マイクロスケールでの研究は共焦点レーザー顕微鏡や $\mu\text{X}$ 線CTなど，微細構造を非破壊的に3次元で観察できる最先端装置の開発と画像処理技術の向上によって，その微細構造をコンピュータ上に精密に再構築することが可能になっており，ここで構築したジオメトリおよびメッシュのCFDシミュレータへのエクスポートも比較的容易になっている。このため，マイクロスケールでのモデル化は，今後，研究の飛躍的な進展が期待される分野のひとつとなっている。

そこで本稿では，CFD/CAEアプローチによって，農産物の物性値を推算する方法と農産システムの最適化について研究例を挙げ，以下に解説する。

## 2. 電磁波照射による農産物表面殺菌モデル

一般に農産物の表面には多くの微生物が常在し，これらの表在菌が腐敗ならびに食中毒を引き起こす原因のひとつとなっている。微生物的リスクを排除するためには，農産物に悪影響の無い条件で殺菌処理を施す必要がある。農産物の多くは熱や紫外線に弱く，過度の電磁波照射によって変色や萎凋を生じる恐れがある。これを回避するためには，赤外線照射では，例えば，イチゴについて45℃以下での低温処理が求められる（Garcia et al., 1995）。同じく，イチゴの紫外線照射殺菌では，照射量が $4\text{ kJ m}^{-2}$ 以下では変色が認められないことが報告されており（Nigro et al., 2000），処理条件の一指標となっている。また，赤外線と紫外線を併用照射することにより低温での効果的な殺菌処理が達成できるとの報告があり（Hamanaka et al., 2011），イチジク等の表面殺菌等で実用化されている。電磁波照射による殺菌では，その照射量と強度分布に注意を払う必要があるが，これらは経験的に決められることが多い。ここでは，モンテカルロ法による赤外線照射と離散座標（Discrete Ordinate：DO）法による紫外線照射の最適化について解説する。

まず，赤外線照射殺菌では，ハロゲンランプ（QIR 100 V 500 W/220，岩崎電気（株））直下90~150 mmに *Cladosporium* sp. 菌液を塗布したPDA培地を含むペトリ皿（直径90 mm）を置き，加熱処理する際の熱移動・殺菌モデルを構築，これを用いたシミュレーションによって培地の温度上昇と死滅曲線を予測した（Trivittayasil, 2011）。流体の流れは連続の式と運動方程式，温度場はエネルギー方程式を離散化して近似計算した。

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_a u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_a u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_a u_i u_j) \\ & = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \nabla p + \rho_a \text{ref} \beta g (T_a - T_{a,\text{ref}}) \end{aligned} \quad (2)$$

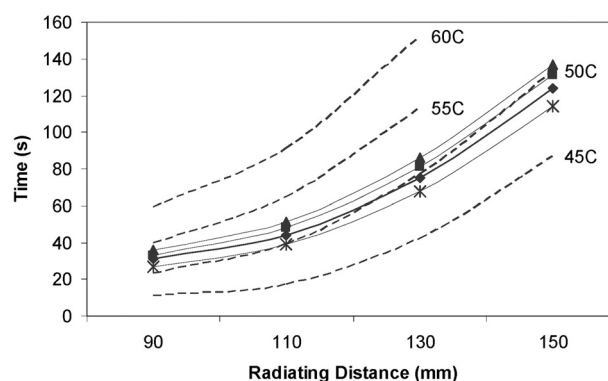


図2 照射距離と任意の温度ならびに菌数に達するまでの時間（点線：等温線，実線：対数減少率 $-\log(N/N_0)$ ，2 \*，3 ◆，4 ■ and 5 ▲）（Trivittayasil et al., 2011）

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_a H) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_a u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\lambda_a}{C_{pa}} \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

また，固体内部の温度場は，適当な条件下で熱伝導方程式を解き算出した。

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T \quad (4)$$

赤外線照射解析については，放射源，放射・反射方向，物理表面での反射の有無をモンテカルロ法により確率的に予測し，放射による熱収支を計算した（Tanaka et al., 2007）。なお，*Cladosporium* sp. の殺菌モデルは次式で表されるものとした。

$$\frac{dN}{dt} = -k(T) \cdot N \quad (5)$$

$$k(T) = k_{\text{ref}} \exp \left\{ \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T} \right) \right\} \quad (6)$$

ここで， $k_{\text{ref}} = 4.08 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ， $E_a = 2.59 \times 10^5 \text{ J mol}^{-1}$ ， $T_{\text{ref}} = 316 \text{ K}$ とした（Trivittayasil et al., 2013）。赤外線ランプならびに各物理表面からの放射はそれぞれの面に適切な放射条件を当てはめ決定し，培地表面の温度変化と死滅曲線を予測，照射距離と任意の温度ならびに菌数に達するまでの時間との関係を求めた（図2）。図中の点線は等温線を表し，ある温度に達するまでの時間が照射距離ごとに読み取れるチャートとなっている。同様に，実線から *Cladosporium* sp. の対数減少量との関係も読み取ることができる。このチャートを利用することにより，品質に影響の無い範囲での殺菌処理条件を決定することが可能となる。

つぎに，紫外線照射によるイチゴの表面殺菌について解説する。流体解析に関しては，基本的に赤外線モデル解析と同様であるが，ここでは紫外線の照射強度をDO法により求めた（Versteeg and Malalasekera, 2007）。

DO 法では合計  $4\pi$  の立体角中で  $n$  個の異なる方向に対して放射の輸送方程式を解き、数値求積法により各方向における積分を置き換えて近似解を得る (Modest, 2003)。ここでは、紫外線透過性の PE フィルム (厚さ 1 mm, UV-C 透過率 0.76) に 9 個のイチゴを載せ、紫外線ランプ位置を調整することで均一な照射強度を得よう最適化を試みた (図 3)。UV-C ランプ (GL-6, 東芝, 有効照射強度  $89 \text{ W m}^{-2}$ ) を 4 本使用し、トレイ上部面から上下ランプまでの垂直距離は PE フィルムの透過性を考慮し、それぞれ 150 mm, 131 mm に設定して、上下それぞれのランプ間距離  $d$  を 150~450 mm の範囲で 50 mm ごとに調整、最も均一な照射分布が得られる距離を変動係数 (=標準偏差/平均) によって決定し、これが最小となる  $d=300 \text{ mm}$  を最適値とした。図 3 にはイチゴ

表面における紫外線の照射強度分布を可視化しているが、本モデルと紫外線殺菌モデル (Trivittayasil et al., 2015) を連成させることによって、表面殺菌の度合いを推定することも可能である。なお、図 3 ではイチゴの両側面に照射不足な部位が見られるが、著者らによる最新の研究では、この問題について既に解決済みである (未公表)。

3. 青果物内における熱・ガス拡散

青果物は収穫後も呼吸など様々な生理活動を営み、青果物内部では雰囲気とは異なった環境が形成される。変化する環境に置かれた青果物は、これに過渡的に反応し、その内部のガス・温度環境は外部環境に追従する形で変化して行く。この変化は青果物の物性、特にガス拡散係数や熱拡散係数に依存するため、これらの値を推算することは重要な課題となっている。ここでは、エタンをトレーサガスとして用いたガス拡散係数推算法について解説する。実験手順であるが、まず、青果物を密閉チャンバに密封し、チャンバ内部ガスのエタン濃度を 1000 ppm 程度に調整、3 日間放置し、内外部が平衡になった時点で新しい密閉チャンバに移す。つぎに、このチャンバの中で青果物内部に吸収されたエタンガスを放出させ、チャンバ内ガス濃度をガスクロマトグラフィで測定するという流れである。一方、モデル解析については、3次元レーザスキャナによって青果物形状を抽出し、コンピュータ上に3次元形状を再構築、マルチフィジックス・シミュレーションソフト COMSOL Multiphysics 4.2 a (COMSOL Inc., Stockholm, Sweden) の 'transport of diluted species' モデルを用いてガス拡散を解析した。内部ガス拡散係数と表面のガス移動抵抗をインプットパラメータとするフィッティング法によって、これらふたつの値を決定した。モデルの詳細については、引用文献に挙げた Rezagah et al. (2014) の報告を参照されたい。図

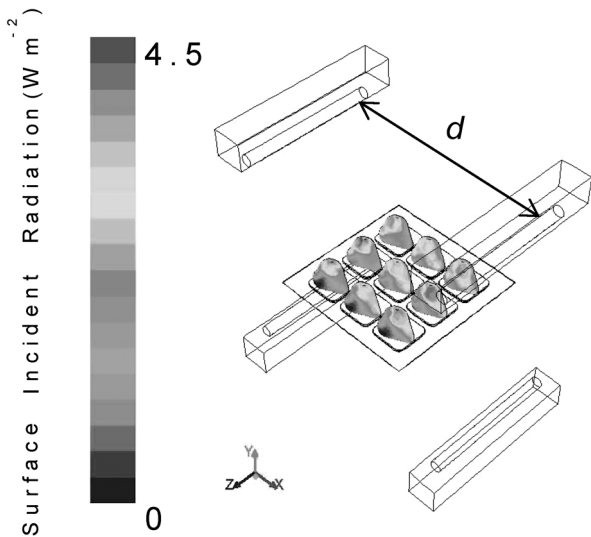


図 3 イチゴ表面における紫外線照射強度分布の予測

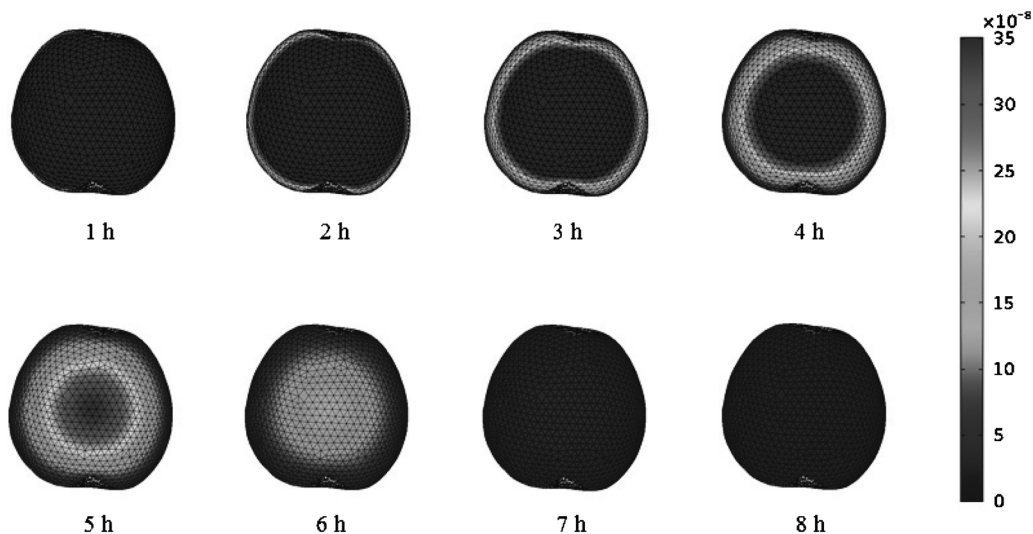


図 4 ナシ果実内部のガス拡散シミュレーション (単位:  $\text{mol L}^{-1}$ ) (Rezagah et al., 2014)



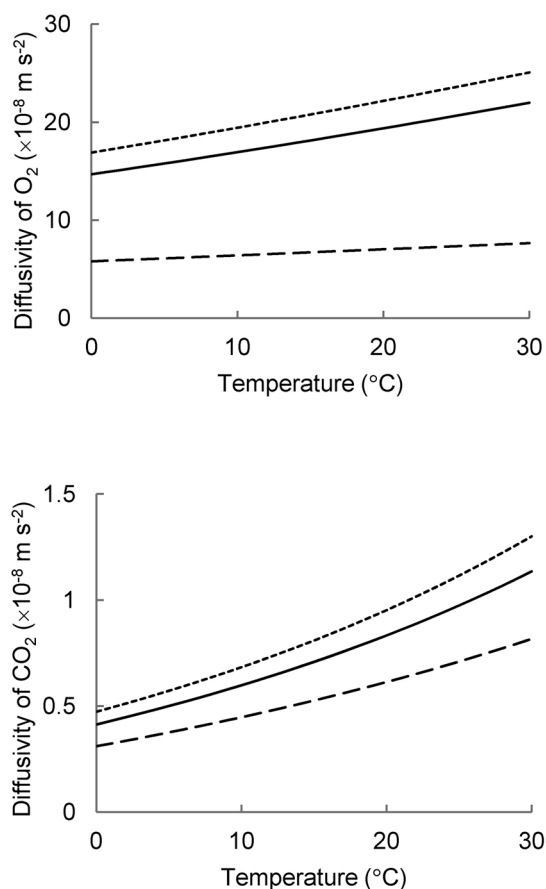


図5 酸素および二酸化炭素の拡散係数（‘幸水’ -----, ‘新高’ -----, ‘王秋’ ——）

4はナシからのエタンガス放出過程における果実内部エタン濃度分布の経時変化である。ナシ果実表面からエタンガスが放出されて行く様子が明瞭に示されている。このエタンガス放出実験から、Pham et al. (2009)の方法に基づいてナシ果実内部における酸素および二酸化炭素の拡散係数を算出し、温度との関係を示した(図5)。水への溶解度が低い酸素は二酸化炭素に比べて拡散しやすく、また、いずれのガスでも温度の上昇とともにその値が大きくなる事が分かる。さらに、品種による違いも確認された。現在、図1に示すX線CTと共焦点レーザー顕微鏡によって取得したマルチ断面画像から個体および細胞組織レベルでの3次元構造モデルを構築し、不均質物質を対象とする研究も遂行中である。細胞組織におけるガス拡散を対象とした先行研究事例としてはAbera et al. (2014)の報告がある。この研究では、 $\mu$ X線CT観察から細胞壁や間隙、細胞を抽出し、コンピュータ上に3次元微細構造を再構築するとともに、不均質材料内のガス拡散シミュレーションを行うことで局所的な移動現象を可視化することに成功している。本シミュレーションを可能にするためには、細胞質材料の持つ形状特性を失わない範囲で画像処理を施し、微細構造モデルを構築することが肝要であるが、表面形状のスムージング化処

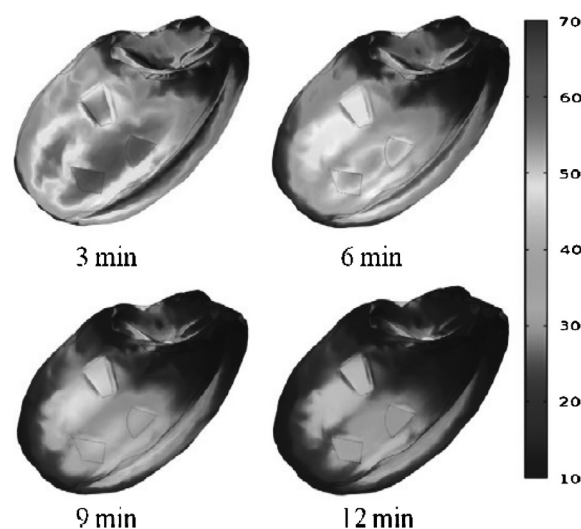


図6 白米の吸水過程における von Mises 応力分布の経時変化 (35°C) (単位: MPa) (Perez et al., 2012)

理によって計算結果に影響があるか否かについて検討するなど、マイクロレベルでの研究を遂行する上での先駆的事例となっている。この研究から、均質材料では得られない不均質な濃度勾配が存在することが確認された。不均質な濃度分布を明らかにすることは、内部で局所的に起こる諸反応を的確に予測し得ることを意味し、青果物の品質保持においてより有益な情報を提供できるものと期待される。

#### 4. 穀物の乾燥・吸水予測

コメの水分脱着操作で起こる割れは食味に大きな影響を与える。このため、割れを生じさせない範囲での脱着操作が不可欠となる。周知のように、米粒の主成分であるデンプンは、水分が十分存在する状態で加熱すると膨潤・糊化し、強い粘性を示す。デンプンを十分に糊化させて炊飯米を美味しく炊き上げるためには、炊飯の前に白米を水に浸漬し、十分に吸水させることが必要である。不適切な浸漬操作による裂傷米粒の発生は炊飯米の食味低下につながるため、この回避が不可欠となる。浸漬による米粒内水分分布の経時変化と亀裂発生を予測するための水分移動-応力連成モデルを開発した(Perez et al., 2011, 2012)。コメの吸水に関する研究は多く報告されているものの、実際の3次元形状モデルを使い、かつ、水分移動とこれに伴う内部応力変化を連成させて解析した例は皆無である。図6に著者らが提案した連成モデルにより予測したコメの吸水過程における von Mises 応力分布の経時変化を示す(Perez et al., 2012)。von Mises 応力は吸水初期において大きくなり、胚芽跡と胚乳の腹部・背部に集中するため、ここから割れが発生することも知られている(Genkawa et al., 2011)。つぎに、コメの吸水過程における温度ごとの von Mises 応力の経時変化を図7に示す。図から明らかなように、浸漬温度が高くなるほど平均 von Mises 応力の値は小さく、そのピーク

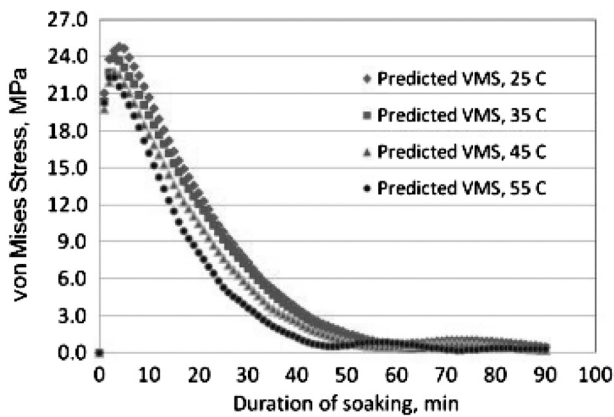


図 7 白米の吸水過程における温度ごとの von Mises 応力の経時変化 (Perez, et al., 2012)

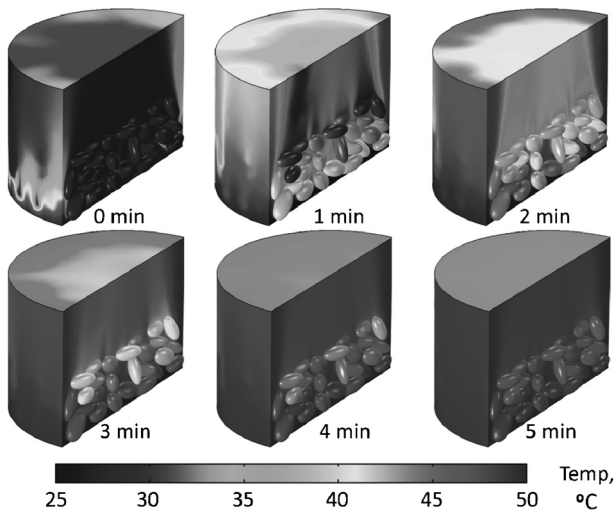


図 8 玄米堆積層の乾燥シミュレーション

の発生が遅くなることが分かる。すなわち、低温ほど割れやすく、その発生が遅くなることが示されており、これは Genkawa et al. (2011) の観察結果に一致する。水分移動と水分膨張による応力の発生を CAE 解析し、吸水過程で起こる諸現象をシミュレーションすることで、割れの生じにくい吸水条件を見出している。その他、CFD による玄米堆積層の通風乾燥シミュレーションモデルも提示されており (図 8)、堆積層における温度・水分分布を知ることによって、この層が薄層であるのか否かを判断したり、層ごとの乾燥速度を知ることが容易にしている (Perez et al., 2015)。

### 5. 青果物の混載輸送コンテナの開発

ここでは、青果物の混載輸送用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。青果物の輸出を促進するためには、多品目の混載が避けられない。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。著者らはパルス放電によって

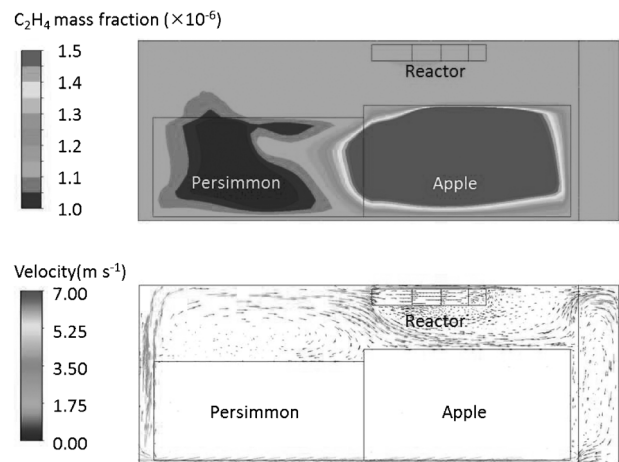


図 9 青果物を混載した 20ft コンテナ内のエチレン濃度および風速分布 (混載 30 分後)

エチレンを分解する装置を開発し、CFD シミュレーションによってコンテナの設計指針を与えることを試みている。図 9 はカキとリンゴを混載した際の 20ft コンテナ内のエチレン濃度および風速分布を示した例であるが、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可視化されている。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け位置、品目間に仕切り板を設置した際の効果などについて検討しており、設計・制御の最適化に寄与する成果である (Umeno et al., 2014)。その他、冷蔵施設における化学種輸送についての研究には、エチレン作用阻害剤 1-MCP の施用シミュレーション (Ambaw, 2013) があるが、化学種輸送モデルを導入した研究例は極めて少なく、今後の発展が望まれる。

### 6. さいごに

以上、本稿では、著者らの研究を中心に CFD/CAE シミュレーション技術のポストハーベスト分野への応用について紹介してきた。CFD/CAE はマルチスケールへの適用が可能であり、各スケールで起こる諸現象を記述するのに役立つ。各スケールで構築したモデルを統合するためにはコンピュータ性能の向上に頼らざるを得ない。しかしながら、スケール間でのデータの引き渡しが容易になれば、マルチスケール・シミュレータとしての機能を発揮することが可能となり、CFD/CAE 解析の高度化につながるものと考えられる。CFD/CAE シミュレーション研究の一層の進展を期待する。

### 記号

主記号

$\beta$ : 空気の膨張係数 ( $K^{-1}$ )

$\lambda$  : 熱伝導率 ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $\mu$  : 動粘性係数 ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )  
 $\rho$  : 密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ )  
 $C_p$  : 比熱 ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $d$  : 長さ (m)  
 $E_a$  : 活性化エネルギー,  $\text{kJ kmol}^{-1}$   
 $g$  : 重力加速度 ( $\text{m s}^{-2}$ )  
 $H$  : エンタルピー ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )  
 $k$  : 殺菌速度定数 ( $\text{s}^{-1}$ )  
 $N$  : 生菌数 ( $\text{CFU ml}^{-1}$ )  
 $p$  : 圧力 (Pa)  
 $R$  : ガス定数 ( $\text{kJ K}^{-1} \text{kmol}^{-1}$ )  
 $T$  : 温度 (K)  
 $u$  : 風速 ( $\text{m s}^{-1}$ )  
 $x$  : 長さ (m)

下付記号

0 : 初期  
a : 空気  
i, j : 要素  
ref : 参照  
s : 固体

引用文献

- Abera, M.K., Verboven, P., Herremans, E., Defraeye, T., Fanta, S. W., Ho, Q.T., Carmeliet, J., Nicolai, B.M., 2014. 3D virtual pome fruit tissue generation based on cell growth modeling. *Food Bioprocess Technology*, 7, 542-555.
- Ambaw, A., Verboven, P., Delele, M.A., Defraeye, T., Tijskens, E., Schenk, A., Nicolai, B.M., 2013. CFD modelling of the 3D spatial and temporal distribution of 1-methylcyclopropene in a fruit storage container. *Food and Bioprocess Technology*, 6 (9), 2235-2250.
- Garcia, J.M., Aguilera, C., Albi, M.A., 1995. Postharvest heat treatment on Spanish strawberry (*Fragaria*  $\times$  *ananassa* Cv. Tudla). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43 (6), 1489-1492.
- Genkawa, T., Tanaka, F., Hamanaka, D., Uchino, T., 2011. Incidence of open crack formation in short-grain polished rice during soaking in water at different temperatures. *Journal of Food Engineering*, 103 (4), 457-463.
- Hamanaka, D., Norimura, N., Baba, N., Mano, K., Kakiuchi, M., Tanaka, F., Uchino, T., 2011. Surface decontamination of fig fruit by combination of infrared radiation heating with ultraviolet irradiation. *Food Control*, 22 (3-4), 375-380.
- Ho, Q.T., Verboven, P., Verlinden, B.E., Herremans, E., Wevers, M., Carmeliet, J., Nicolai, B.M., 2011. A three-dimensional multiscale model for gas exchange in fruit. *Plant Physiology*, 155 (3), 1158-1168.
- 星 典宏, 山口智治, 大兼政雄二, 前川孝昭, 2002a. 数値解析による畜舎内空気分布特性に関する研究 (第1報)—換気方式の相違による舎内流れ特性の解析—, *農業施設*, 32 (4), 185-194.
- 星 典宏, 山口智治, 大兼政雄二, 前川孝昭, 2002b. 数値解析による畜舎内空気分布特性に関する研究 (第2報)—給気口の相違による空気交換効率の解析—, *農業施設*, 33(3), 173-182.
- Ikeguchi A., 1990. Prediction of airflow pattern influenced by incoming jet direction with FEM in confinement livestock house. *Journal of Agricultural Structure, Japan*, 23 (3), 117-125.
- Kitazawa, H., Funaki, T., Nakao, M., Ohshiro, Y., Hiruta, M., Ishikawa, Y., 2012. Air Flow Visualization for Fresh Produce Packaging by CFD Analysis. *Food Science and Technology Research*, 18 (4), 525-534.
- 小西慶浩, 田中史彦, 内野敏剛, 濱中大介, 2009. 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), 159-165.
- Modest, M.F., 2003. *Radiative Heat Transfer*, Academic Press, London.
- Moureha, J., Flick, D., 2004. Airflow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets. *International Journal of Refrigeration* 27, 464-474.
- Nahor, H.B., Hoanga, M.L., Verbovena, P., Baelmansb, M., Nicolai, B.M., 2005. CFD model of the airflow, heat and mass transfer in cool stores. *International Journal of Refrigeration*, 28, 368-380.
- Nigro, F., Ippolito, A., Lattanzio, V., Di Venere, D., Salerno, M., 2000. Effect of ultraviolet-C light on postharvest decay of strawberry. *Journal of Plant Pathology*, 82 (1), 29-37.
- Perez, J.H., Tanaka, F., Tanaka, F., Hamanaka, D., Uchino, T., 2015. Modeling of mass transfer and initiation of hygroscopically induced cracks in rice grains in a thermally controlled soaking condition: With dependency of diffusion coefficient to moisture content and temperature - A 3D finite element approach. *Drying Technology*, 33 (11), 1350-1359.
- Perez, J.H., Tanaka, F., Uchino, T., 2011. Comparative 3D simulation on water absorption and hygroscopic swelling in japonica rice grains under various isothermal soaking conditions. *Food Research International*, 44 (9), 2615-2623.
- Perez, J.H., Tanaka, F., Uchino, T., 2012. Modeling of mass transfer and initiation of hygroscopically induced cracks in rice grains in a thermally controlled soaking condition: with dependency of diffusion coefficient to moisture content and temperature - a 3D finite element approach. *Journal of Food Engineering*, 111 (3), 519-527.
- Pham Q. T., Bulens I., Ho Q., Verlinden B.E., Verboven P., Nicolai B. (2009). Simultaneous measurement of ethane diffusivity and skin resistance of 'Jonica' apples by efflux experiment. *Journal of Food Engineering*, 95 (3), 471-478.
- Rezagah, M. E, Ishida, S., Tanaka, F., Hamanaka, D., Uchino, T., 2013a. Three-dimensional heat transfer modeling of Japanese pear (*Pyrus pyrifolia*) during tempering. *Food Science and Technology*, 19 (5), 765-771.
- Rezagah, M.E, Ishida, S., Tanaka, F., Uchino, T., Hamanaka, D., Hikida, Y., 2013b. Determination of gas diffusivity and skin resistance for three cultivars of Japanese pear using their actual 3D geometry. *Environment Control in Biology*, 51 (4), 193-200.
- Rezagah, M.E, Ishida, S., Tanaka, F., Uchino, T., Hamanaka, D., Hikida, Y., 2014. Temperature dependency of gas diffusivity and skin resistance of Japanese pear (*Oushuu*) based on the fruit's true 3D geometry. *Food Science and Technology Research*, 20 (2), 247-253.
- Sun, H., Stowell, R.R., Keener, H.M., Michel, F.C., Jr., 2000. Two-dimensional computational fluid dynamics (CFD) modeling of air velocity and ammonia distribution in a high-rise hog building. *Transactions of ASAE*, 45 (5), 1559-1567.

- 田中 晃, 田中俊一郎, 田中史彦, 2001. 多孔質モデルを用いた流路抵抗を有する施設内気流の解析, 農機誌, 63 (4), 73-79.
- Tanaka, F., Chatani, M., Kawashima, H., Hamanaka, D., Uchino, T., 2012. CFD modeling of infrared thermal treatment of figs (*Ficus carica* L.). *Journal of Food Process Engineering*, 35 (6), 821-828.
- Tanaka, F., Konishi, Y., Kuroki, Y., Hamanaka, D., 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.
- Tanaka, F., Verboven, P., Scheerlinck, N., Morita, K., Iwasaki, K., Nicolai, B.M., 2007. Investigation of far infrared radiation heating as an alternative technique for surface decontamination of strawberry, *Journal of Food Engineering*, 79 (2), 445-452.
- Trivittayasil, V., Nashiro, K., Tanaka, F., Hamanaka, D., Uchino, T., 2015. Inactivation characteristics and modeling of mold spores by UV-C radiation based on irradiation dose, *Food Science and Technology Research*, 21 (3), 365-370.
- Trivittayasil, V., Tanaka, F., Uchino, T., 2011. Investigation of deactivation of mould conidia by infrared heating in a model-based approach, *Journal of Food Engineering*, 104 (4), 565-570.
- Trivittayasil, V., Tanaka, F., Hamanaka, D., Uchino, T., 2013. The inactivation model of mold spores by infrared heating under non-isothermal condition, *Food Science and Technology Research*, 19 (6), 979-982.
- Umeno, Y., Duong, H.V., Tanaka, F., Hamanaka, D., Uchino, T., 2015. The use of CFD to simulate temperature distribution in refrigerated containers. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 8 (4), 257-263.
- Umeno, Y., Tanaka, F., Uchino, T., Hamanaka, D., Three dimensional prediction of ethylene concentration inside a container for consolidated transport, *Proceedings of International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering 2014*, 21-23, May, ILan University, Taiwan, 257-262.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method*, Second Ed., Pearson Education Limited, Harlow, England.
- 趙 淑梅, 山口智治, 星 典宏, 畔柳武司, 李 保明, 2005. CFDによるパッドアンドファン冷房温室室内の気流および温度分布解析, 農業施設, 36 (1), 17-26.