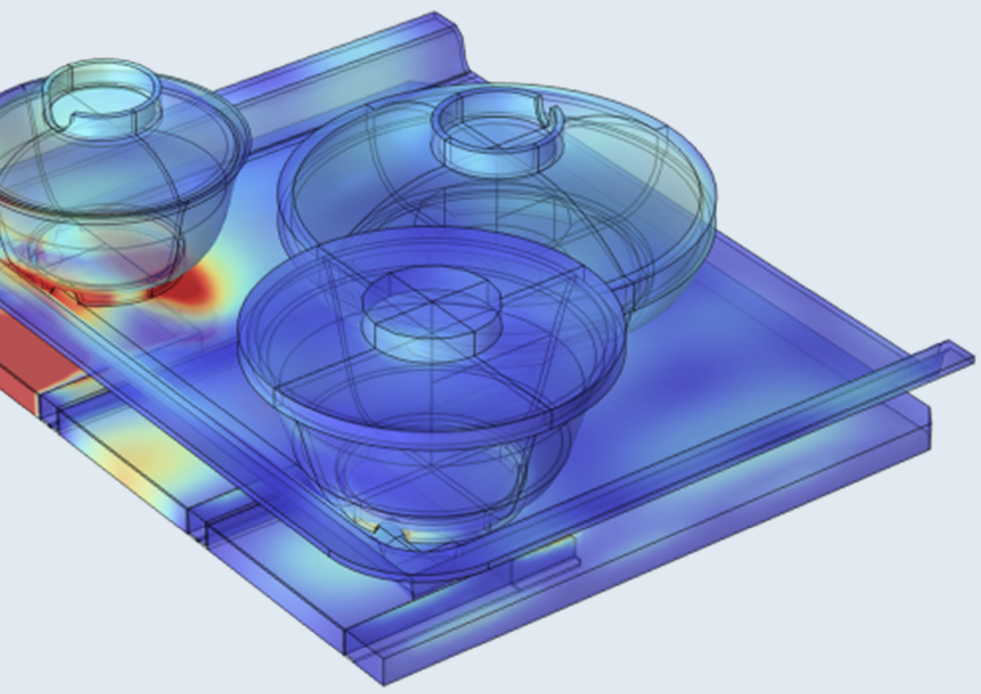


高周波・伝熱連成解析を用いたマルチマグネトロン方式のマイクロ波加熱モデリング

性質が異なる3つの食品が混在するモデルにおける伝熱・電磁挙動を予測可能な3次元熱・電磁界連成モデルを構築した.

大津優斗,アベアアンドレス,ラベイヴァン,福岡美香
東京海洋大学大学院　食品熱操作工学研究室

背景及び目的

近年,病院や介護施設における食事提供では,セントラルキッチンで一括調理・冷却された食品を,施設側で提供直前に再加熱するシステムが普及している.施設での再加熱工程では,一つのトレイに混在する誘電特性の異なる複数の食品を同時に,かつそれぞれ最適な温度に仕上げる技術が求められており,その有効な手段としてマイクロ波加熱の活用が期待されている.しかし,これを実現するマルチマグネトロンシステムにおいては,食品が混在することで庫内の電磁波干渉や反射が極めて複雑化するため,実験的な1点温度測定のみで過渡的な干渉現象やエネルギー収支を完全に把握することは困難である.そこで本研究では,複数食品の同時最適加熱において生じる複雑な電磁波干渉のメカニズム解明を目的とし,米飯（空隙と飯粒の二相系）・主菜に見立てたモデル食品（含水率80%のマッシュポテト）・汁物（水）が混在する系における過渡的な伝熱・電磁挙動を予測可能な3次元熱・電磁界連成モデルを構築した.

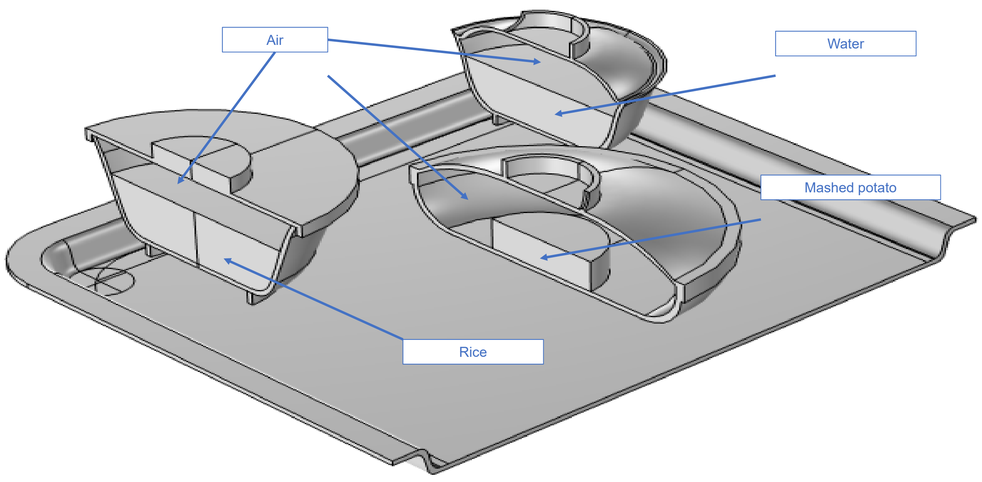


図1.　モデル内の試料の材料及び形状

解析内容

各試料を実加熱時間,初期温度20℃の加熱条件を対象としてモデルを構築した.物理モデルの構築には,RFモジュールの電磁波（周波数領域）（金属以外の部分に適応）および伝熱モジュールの固体・液体伝熱（試料及び容器に適用）,層流（水に適用）を使用し,電磁界・熱伝導連成解析（時間依存）を実行した.試料熱物性および誘電特性には,試料組成及び実測値に基づく温度依存性を導入し,米飯の誘電特性には見かけ均相モデル（CRIM混合則）を適用した(参考文献1).また,マルチマグネトロンの周期的ON/OFFステップ制御に伴う不連続な高周波入力を安定して計算するため区分的関数を導入し,ポート境界（出力800 W, 周波数2450 MHz）の時分割スケジューリングを厳密にモデル化した.実測データとの比較のため,モデル上で各試料中心座標に温度プローブを設定し,得られた計算結果と光ファイバー温度計による実測温度履歴との比較を行った.

結果

図2に示すように,各試料中心部における実測温度とシミュレーション予測値の比較を行った.全体として,自ポートのON/OFFに伴う急激な昇温や,他ポートからの電磁波干渉による階段状の温度上昇を良好に再現した.特に米飯は全時間域で高い一致を示した.一方で,水の高温域で見られた予測値の乖離は,誘電特性を固定値として近似して計算したことに起因すると推察される.また,ポテトの中盤で見られた実測値との誤差については,庫内の他箇所における電磁波吸収がモデル上で過大に見積もられ,ポテトへのエネルギー分配が減少したからである.現在,実際の空間的なエネルギー分配をより正確に再現するため,壁面の境界条件等を含めて再検討を進めている.以上より,本モデルは食品混在環境下における分割照射に伴う加熱挙動と電磁波過干渉の影響を予測でき,加熱スケジュールの最適化に有用であることが示された.

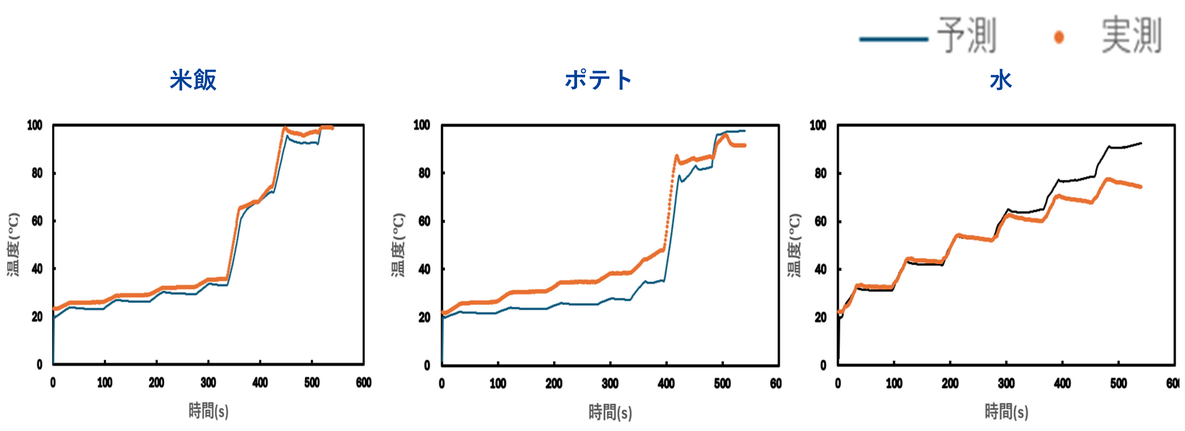


図2.　各試料中心部温度推移のシミュレーションと実測の比較

参考文献

1) A. Abea, C. Sugihara, Y. Llave, S. Sudou, M. A. Redo, M. D. Guàrdia, I. Muñoz, M. Fukuoka, “Computer simulation of ready-to-eat rice reheating on a microwave oven: Application of dielectric mixture equations in foods of varying porosity ratio”, Journal of Food Engineering, 398, 112598, 2025.

国立大学法人
東京海洋大学
Tokyo University of Marine Science and Technology

The Proceedings of the COMSOL Conference 2026 Tokyo より抜粋