

# 冷凍マグロのバーチャル解凍を実現する CAEアプリの試行開発

Trial Development of CAE Application  
for Virtual Thawing of Frozen Tuna

米大海<sup>1)</sup>, 橋口真宜<sup>2)</sup>, 村松良樹<sup>3)</sup>

Dahai Mi, Masanori Hashiguchi and Yoshiki Muramatsu

- 1) 工博 計測エンジニアリングシステム株式会社 技術部 部長 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5, SF内神田ビル5F, E-mail: midahai@kesco.co.jp)
- 2) 技術士(機械部門) 計測エンジニアリングシステム株式会社 主席研究員 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F, E-mail: hashiguchi@kesco.co.jp)
- 3) 博士 東京農業大学 生産環境工学科 教授 (〒156-8502 東京都世田谷区桜丘1-1-1, E-mail: y-murama@nodai.ac.jp)

Freezing is an important technology that enables long-term preservation of food while maintaining freshness and deliciousness, thus balancing taste with the reduction of food waste. However, since frozen tuna is typically consumed as sashimi after thawing, there is a strong desire for achieving thawing that preserves both texture and flavor. Moreover, there is a need for a mechanism to examine on-the-spot thawing processes by various individuals in restaurants and homes. In this paper, we report on our attempt to develop a finite element method (FEM) model and CAE application with consideration of phase change during thawing process to achieve virtual thawing of frozen tuna, for those interested in the thawing process of food.

**Key Words :** Thawing Process, Frozen Tuna, Phase Change, FEM, CAE Application

## 1. はじめに

冷凍は食品の鮮度やおいしさを保って長期保存が可能な、美味とフードロスの削減が両立する重要技術です。しかし、冷凍マグロは解凍後に刺身として食されるため、食感と旨味を損なわない解凍の実現と、料亭や家庭で様々な人達によるその場での解凍プロセス検討の仕組みが切望されています。本稿では冷凍マグロの解凍に関心をもつ人達のバーチャル解凍を実現すべく、相変化を伴うFEMモデルとCAEアプリの開発を試行したので報告します。

## 2. 問題定義

本稿では、マグロの冷凍さくを対象に1D及び3D解析CAEアプリの開発を実施します。さらに、大型冷凍マグロの解凍解析も検討します。

マグロの解凍方法として、冷蔵庫解凍、氷水解凍、流水解凍、多段階解凍(室温解凍⇒冷蔵庫解凍)など、様々な方法が存在しています。冷凍マグロの形状、サイズ、種類、冷凍状況や、解凍方法の選択によって風味が変わります。

本稿では、マグロの形状及び物性を可変パラメータにして、それらが解凍効果に及ぼす影響を検討します。また、伝熱計算の熱流束境界条件を利用し、外部温度及び熱伝達係数の調整で様々な解凍方法を表現します。解析モデル及びCAEアプリの開発は、市販有限要素法解析ソフトウェアCOMSOL Multiphysics®を利用しました。

### (1) 1D解凍解析のジオメトリとメッシュ

1Dモデルでは、冷凍さくの厚み方向へ中心から表面までをモデリング領域としました。CAEアプリでは、厚みを変更可能な入力パラメータとしました。メッシュを作成する際に、表面に向けて細かいメッシュを適用しました。

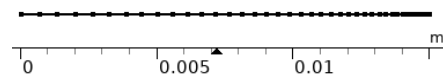


図-1 1Dモデルのジオメトリ及びメッシュ

図1に示すように、左側端点はさくの厚み方向の中心で、対称条件を適用します。右側端点はさくの表面点で、熱流束条件を適用します。

### (2) 3Dモデルのジオメトリとメッシュ

3Dモデルでは、直方体の冷凍さくの厚み方向の上半分のみをモデリングしました。上下を分割する面に対称条件、その他の面には熱流束条件を適用しました。また、外部からマグロの形状データをインポートできるようにジオメトリシーケンスを設計しました。

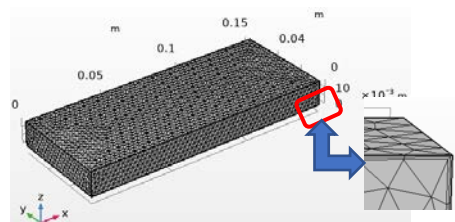


図-2 3Dモデルのジオメトリ及びメッシュ

図2に3D直方体モデルの形状及びメッシュを示します。底面(xy面)は対称条件を適用する境界です。すべての熱流束境界に境界層メッシュを適用しました。

### (3) 伝熱及び相変化物性

本稿では、マグロ冷凍さく初期温度、解凍時の熱伝達条件、モデル規模を削減するための対称条件を入力可能な熱伝導方程式を解くCAEアプリを作成しました。1D冷凍さくモデルについてそれぞれ冷蔵庫解凍、氷水解凍、流水解凍、多段階解凍を実施し、3D冷凍さくモデルについては冷蔵庫解凍を実施しました。大型冷凍マグロについては冷蔵庫解凍を実施しました。

冷蔵庫解凍(図4)では、外部環境温度を5degC、熱伝達係数を10W/(m<sup>2</sup>\*K)、解凍時間を6hに設定、氷水解凍(図5)では、環境温度を0degC、熱伝達係数を230W/(m<sup>2</sup>\*K)、解凍時間を1.5hに設定しました。流水解凍(図6)では、環境温度を20degC、熱伝達係数を300W/(m<sup>2</sup>\*K)、解凍時間を20minに設定しました。2段階解凍(図7)では、先ず温度20degC、熱伝達係数15W/(m<sup>2</sup>\*K)の室内環境に20min放置し、その後冷蔵庫に戻して5h40minかけて解凍する設定をしました。

解凍に伴う相変化を計算するため、必要な材料物性は、図3に示す凍結状態及び解凍後の密度、熱伝導率、定圧比熱、相変化温度、相変化区間及び潜熱です。

▼ 相変化物性	
相変化温度:	-1.5 °C
相変化区間:	1 K
潜熱:	56.8 kcal/kg
密度(凍結状態):	1020 kg/m <sup>3</sup>
熱伝導率(凍結状態):	1.27 kcal/(m·h·K)
定圧比熱(凍結状態):	0.46 kcal/(kg·K)
密度(未凍結時):	1080 kg/m <sup>3</sup>
熱伝導率(未凍結時):	0.73 kcal/(m·h·K)
定圧比熱(未凍結時):	0.82 kcal/(kg·K)

図-3 相変化を含む伝熱用物性値の一例

## 3. 解析結果とディスカッション

1Dモデルについて、それぞれの解凍方法において、中心点温度、表面点温度、表面点に通過する熱流束の時間変化を図4に示します。3Dモデルについて、後述の図8、9で3D温度及び相変化境界のプロフィールも表示します。

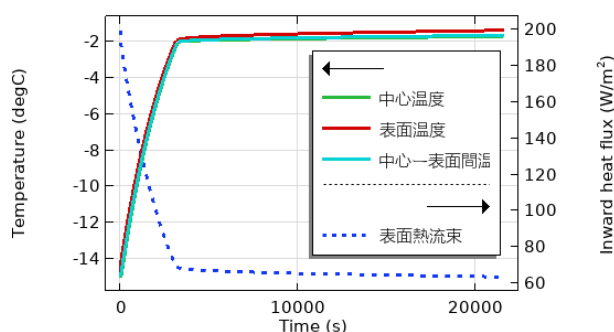


図-4 1Dモデル冷蔵庫解凍の温度及び熱流束変化

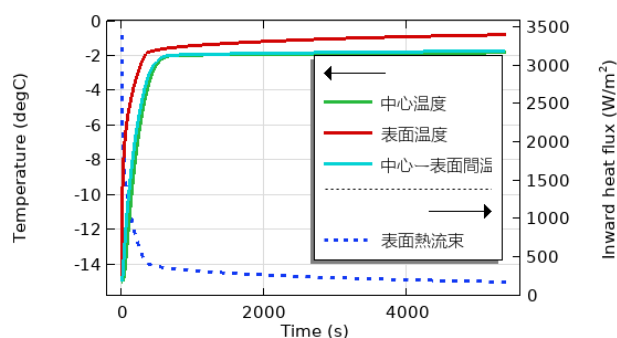


図-5 1Dモデル氷水解凍の温度及び熱流束変化

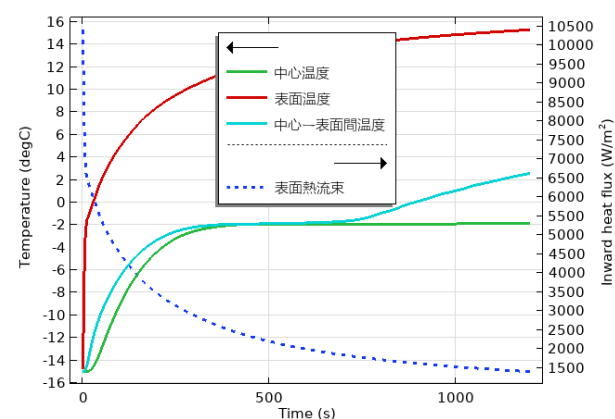


図-6 1Dモデル流水解凍の温度及び熱流束変化

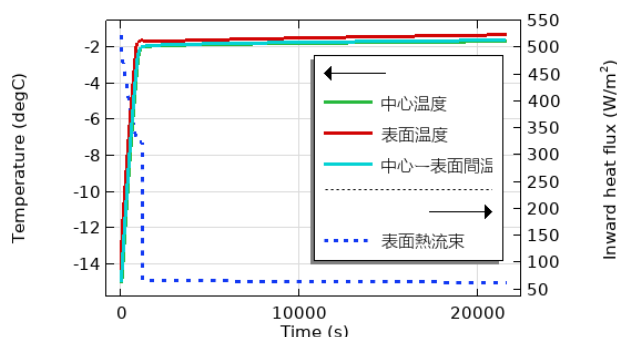


図-7 1Dモデル2段階解凍の温度及び熱流束変化

1Dモデルの結果から、冷蔵庫解凍の場合(図4)、熱伝達係数が小さいため、ゆっくりした解凍プロセスとなりました。2段階解凍(図7)では、冷蔵庫に入れる前に20minの室内環境解凍プロセスがあるため、冷蔵庫解凍よりはやく相変化温度に到達し、解凍が加速されました。また、冷凍さくを冷蔵庫に移動する際の熱流束の不連続も観察できました。氷水(図5)及び流水解凍(図6)では、熱伝達係数が大きいので、冷蔵庫解凍より解凍時間が大幅削減できました。しかし流水解凍では、マグロの一部が十数度まで昇温して、マグロの食感及び風味に影響する恐れがあります。

3Dモデルの冷蔵庫解凍結果(図8、9)から、6h後の温度及び相変化界面を確認できました。また、この場合の解

析条件と1Dモデルの冷蔵庫解凍と同じですが、中心点及び表面点上の温度変化プロフィールに差が観察されました。これは3Dモデルの場合、厚み方向の上部端面だけではなく、冷凍さくの側面からも熱流束が流入することが表現できたため、1Dモデルより昇温が少しはやい結果になったと考えられ、妥当な結果です。

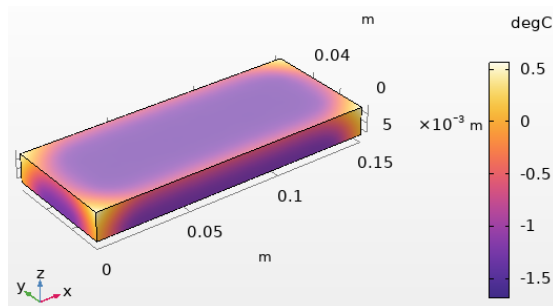


図-8 3Dさくモデル冷蔵庫解凍の6h後温度分布

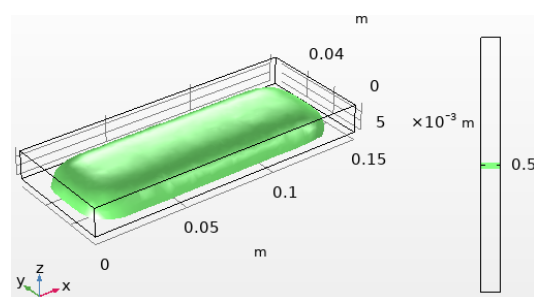


図-9 3Dさくモデル冷蔵庫解凍の6h後相変化境界

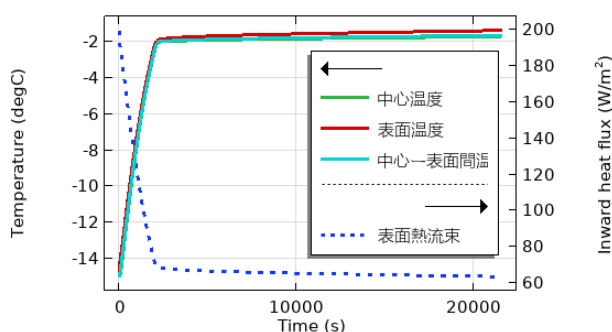


図-10 3Dさくモデル冷蔵庫解凍の温度及び熱流束変化

#### 4. 解凍アプリ開発

解凍プロセスは、解凍対象の形状やサイズ、材料物性、解凍環境、時間及び段階設計など、様々な要因に影響されます。このような複雑なプロセスのWhat if分析及び最適なプロセス設計では、数値解析は非常に強力なツールになります。しかし、数値解析を利用するために、数理論の把握、解析ソフトライセンスの入手、ソフトの使い方の習得など、幾つかの壁が存在しているため、数値解析はまだまだ世の中に普及されていないのが現状です。そこで、複雑な数理論を「誰でも分かる・使える」アプリにパッケージして、ライセンスフリーで配布できれば、様々な業界・研究教育分野のDX促進を実現できると考えます。本稿では、CAEアプリの一例として、図11のような冷凍マグロのバーチャル解凍を実現するアプリを設計しました。

このアプリの上部には、1D及び3Dモデルのジオメトリ

リ・メッシュの作成メニュー、計算実行及び各種結果プロットメニューを配置しました。アプリの左側に、解凍方法、解凍対象の物性値、解凍対象の形状及び寸法に関するパラメータの入力欄を設計しました。アプリの右側には、解析対象の形状、メッシュ及び様々な解析結果をプロットするグラフィックスウィンドウになります。数値解析の知識がない方でも、簡単にパラメータを調整することで、様々な食材に対して、すばやく各種解凍プロセスを分析することが可能と考えます。さらに図12のような現実の形状データを取り入れることによって、よりリアルな数値実験を誰でもできる時代がもうきていると考えます。

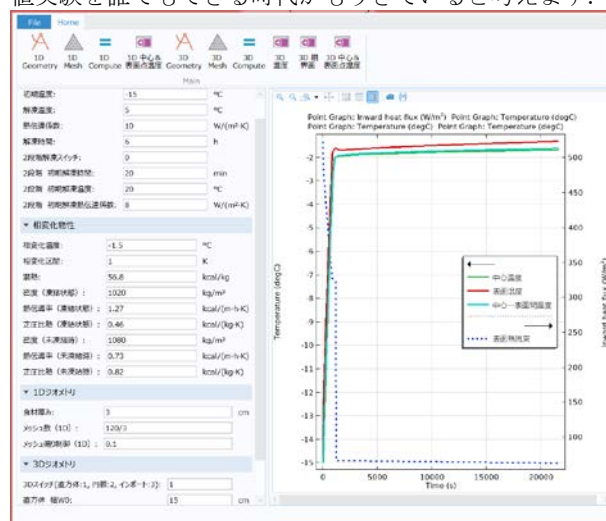


図-11 バーチャル解凍を実現するCAEアプリの設計

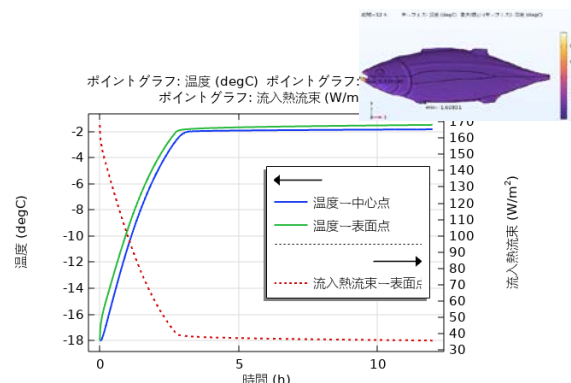


図-12 大型冷凍マグロのバーチャル解凍

#### 5. まとめ

本稿では、冷凍マグロのバーチャル解凍CAEアプリを作成しました。このアプリで様々な解凍プロセスをテストし、各解凍方法の特徴をより定量的に把握できることを示しました。複雑なプロセスの分析・設計において、CAEアプリの有用性を検証できました。

##### 参考文献

- [1] 村松良樹, 橋口真宜, 米大海: ことはじめ 加熱調理・食品加工における伝熱解析, 近代科学Digital, 2023年.
- [2] 数値解析アプリ - Tokyo University of Agriculture, <https://nodaiweb.university.jp/comsol-app/> (参照日: 2024年3月20日).