

---

## 通電加熱による固体様食品の加熱加工 －3次元加熱・反応シミュレーションによる最適化

東京海洋大学学術研究院食品生産科学部門・教授 福岡 美香

---

### ■ 目 的

通電加熱(ジュール加熱)は、電圧を印加した食品自体の抵抗によって自己発熱させる加熱方法である。この技術は高い熱効率を誇り、温水や蒸気などの熱媒体を必要とせず、比較的均一な温度分布を短時間で実現できるため、環境負荷の低減が期待される。しかし、発熱を決定する食品の導電率は温度依存性があり、加熱時間が進むにつれて、当初はわずかだった温度差が次第に大きくなることがあり、粘度の高い液状食品や固体食品への応用に向けた課題となっている。さらに、多くの食品は、導電率が異なる要素からなる多成分系であり、組織構造も有しているため、電極の配置、印加電圧の制御が重要となる。

これらの課題に向けて本研究では、粘性の高い食品として液卵の低温殺菌を、また固体食品としてサーモンフィレの加熱を対象とした実験を行う。いずれも3次元有限要素法を用いたシミュレーションを行い、加熱システムの最適化へ役立つツールを構築する。液卵の殺菌では、温度変化とともに、反応シミュレーションを行い、環境負荷低減と高品質化の両立を目指す。このアプローチにより、通電加熱プロセスの効率的な設計が可能となり、固体食品の加熱加工や調理における利用が広がることが期待できる。

### ■ 方 法

ジュール加熱装置(FJB-5.5、フロンティアエンジニアリング(株))を用いて、周波数 20 kHz、一定電圧下で加熱実験を行った。液卵の低温殺菌では、卵白と卵黄に分離し、容器に立方体のポリスチレン製断熱素材を用いて、内部を円筒形にくり抜いて試料部とし、平板状攪拌パドルと高トルク低速攪拌機からなる攪拌併用通電加熱システムを構築した。品質評価として起泡性、乳化性を測定した。統合型有限要素法解析ソフト COMSOL Multiphysics 6.2 を用いて温度シミュレーションを行い、実測値と比較した。さらにタンパク質変性、殺菌価の3次元シミュレーションを行った。

サーモンフィレを対象とした実験では、サーモン各部位の2次元  $^1\text{H}$ -NMR 画像法(MRI)を取得した。画像により得られた組織構造情報を反映させた3次元要素モデルを作成して温度シミュレーションを行い、実測値と比較した。

### ■ 結果および考察

攪拌通電加熱システムで液卵を加熱した結果、攪拌を併用することで均一な温度分布となることが確認できた。さらに攪拌速度を速めることで、短時間・効率的に殺菌が達成された。温度シミュレーションの結果は実測値とよく一致し、構築したモデルの妥当性が示された。反応シミュレーションによって加熱によるタンパク質の変性はわずかであり、液卵の品質には大きな影響を与えないことが示された。

サーモンフィレでは、脂質含量が高い部位で昇温が遅くなることが示された。これは、脂質含量が高い部位で導電率が低い事に起因する。また、筋繊維の向き(平行または直列)によって加熱の進み方が異なり、直列モデルでは温度上昇が遅いことが実測とMRIによって観測した組織構造を反映させたシミュレーションで確認された。

### ■ 結 語

本研究では、エネルギー効率が高く、環境負荷低減が期待される高周波通電加熱を用いた液卵の低温殺菌、サーモンフィレの通電加熱を行った。粘性の比較的高い卵白ならびに卵黄液を対象として、電磁界・熱伝導・流体解析に反応を考慮した3次元有限要素モデルを構築し、卵タンパク質の加熱変性を極力抑えつつ、必要な殺菌価を得る加熱条件を導き出す予測モデルを提案することが出来た。サーモンフィレの加熱では、MRIを用いてミクロレベルでの組織構造を取得し、結合組織の配置や厚みが通電プロセスに与える影響をシミュレーションによって明らかにした。