

## 食品の効率的熱処理のための加熱冷却過程の解析

関根正裕\* 土屋正樹\*\* 平野 聡\*\*\*

Simulation Analysis of Heating Processes for Efficient Thermal Treatments in Food Processes

SEKINE Masahiro\* , TUCHIYA Masaki\*\* , HIRANO Satoshi\*\*\*

### 抄録

コンピュータシミュレーションによる熱処理最適化技術の可能性を検討した。凍結乾燥魚肉粉に加水した魚肉ペーストとジャガイモデンプンの比熱、密度及び熱伝導率を測定した結果、各熱物性値は水分量と温度に依存した。この結果を用いてデンプンとタンパク質の粒子分散複合モデルの熱物性値を推定し、熱移動とデンプン糊化に伴う水分移動を考慮した有限体積法プログラムにより加熱工程のシミュレーションを行った。解析結果は実際の加熱試験における各部の温度経過及び水分分布の変化と符合し、デンプン含有食品の品質に対する加熱処理の影響をコンピュータシミュレーションにより予測可能なことが示された。

キーワード：熱処理、シミュレーション、デンプン、魚肉、水分分布

### 1. はじめに

食品に保存性・流通性を付与する加熱・冷却処理は最も古く基本的な加工技術であるが、これらの処理コストは製造コストの大半を占めることから、現在も材料、装置、プロセスなどから多角的に研究され技術革新は続けられている<sup>1, 2)</sup>。熱処理の省エネルギー化についても地球資源問題や環境問題と深く関わるために広く研究され<sup>3)</sup>、(財)省エネルギーセンターによる実際の取組も行われている<sup>4)</sup>。しかし、食品産業における省エネルギー化には品質の維持という関門がある。食品品質に対し消費者が要求する水準は高く、製造過程を省エネルギー化したときに品質にわずかなでも変化があれば商品価値は大幅に低下する。そのため、

これまでのエネルギー面だけのアプローチでは省エネルギーの効果に限界があった。そこで本研究では食品加工における熱処理の意義や品質への影響を考慮しながら熱処理の効率化を図る研究の端緒として、食品の加熱工程に対するコンピュータシミュレーションの可能性を検討した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 材料

ジャガイモデンプンは島田化学工業(株)製食品用精製デンプンを用いた。魚肉粉は冷凍鱈摺身を凍結乾燥した後、粉碎して用いた。120 乾燥法により分析した水分量は、ジャガイモデンプン13.8%、魚肉粉6.1%であった。

#### 2.2 熱物性測定

##### 2.2.1 密度

糊化前のデンプンはそのまま試料として用い、糊化後のデンプンゲル及び魚肉粉は所定の水分含有量に調整してハパート瓶法(大型比重瓶)により

\* 北部研究所 生物工学部

\*\* 三洋電機(株)

\*\*\* (独)産業技術総合研究所

測定した。

2.2.2 比熱

所定の水分含有量に調整した試料を用い、水とヘプタンを対照とした示差走査熱量分析法(DSC法)にて測定した。デンプンの糊化温度域(50~60)では測定が困難なため、糊化前後で比熱が直線的に変化すると仮定した推定値を用いた。

2.2.3 熱伝導率

所定の水分量に調整した試料を35mm 円筒セルに充填し、ホットディスク<sup>TM</sup>熱物性測定装置を用いて非定常面熱源法による熱伝導率を求めた。デンプンはキサンタンゲルに分散させて測定し、試料を粒子分散複合体と見なして Maxwell-Aucken 式<sup>5)</sup>

$$= c \left\{ \frac{d+2}{d+2} \frac{c+2}{c-} \left( \frac{d-}{d-} \frac{c}{c} \right) \right\}$$

( c : 連続層熱伝導率、 d : 粒子熱伝導率、 : 体積分率 )

によりデンプンの熱伝導率 を求めた。糊化前は材料配合から推定し、糊化後はデンプンが分散相のキサンタンゲルから水分を十分に吸水しデンプンとキサンタンゲルの水分量が同一になっている状態の体積分率とした。

2.3 加熱試験

ジャガイモデンプン17.5g、魚肉粉17.5g、蒸留水52.5g の配合でデンプン含有魚肉ペーストを調整し、内径29mm、長さ80mm、厚さ1mm の SUS 製円筒に充填し、80 に保持した水浴中に入れ加熱した。円筒中心、中心から7.5mm、同12.5mm 及び円筒外壁に0.6mm K 熱電対を設置して加熱中の温度経過を測定した。50分間加熱した後、変性した円柱状ゲルを中心~5mm、5~10mm、10mm から外側の3層に切り分け、各層の水分量を120 乾燥法により測定した。

2.4 加熱シミュレーション

前記デンプン含有魚肉ペーストの加熱過程に対し、有限体積法汎用熱流体解析コード STAR-CD を用いて熱及び水分分布のシミュレーションを行った。熱移動は熱伝導方程式に従い、水分移動はデンプン糊化時の吸水に起因する拡散方程式に従

うものとして解析した。材料の熱物性はデンプンの体積分率 から推定した。密度及び比熱は積層合成式<sup>5)</sup>

$$K = K\text{-starch} \cdot + K\text{-fish} \cdot (1 - )$$

( K : 密度、比熱、 : デンプン体積分率 )

を用いて算出し、熱伝導率 の算出には前述の Maxwell-Aucken 式<sup>5)</sup> を用いた。

熱及び水分は円筒外壁から中心までの一方向のみ移動する見なしして次元解析を行った。

3. 実験結果

3.1 デンプン及び魚肉ペーストの熱物性

未糊化のジャガイモデンプン密度は28 で1480 kg/m<sup>3</sup>、50 で1486kg/m<sup>3</sup>と温度変化は小さかった。魚肉粉に水を加えた魚肉ペーストの密度は図1に示した通り、水分量及び温度により変化した。

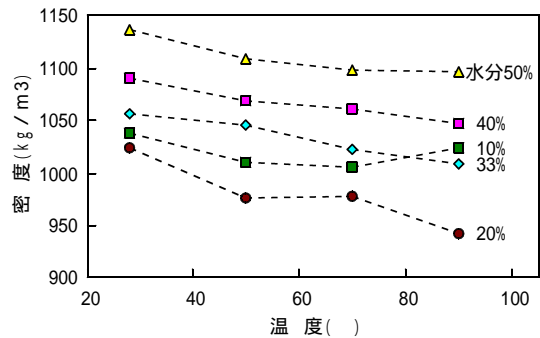


図1 魚肉ペーストの密度

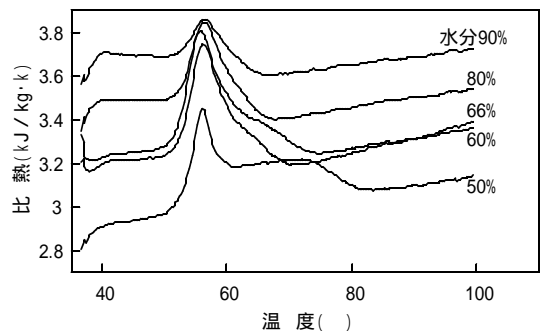


図2 デンプンの比熱

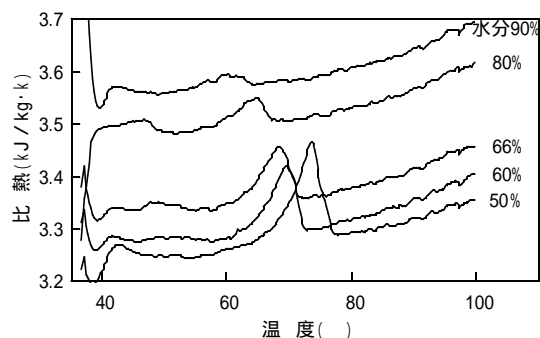


図3 魚肉ペーストの比熱

図2及び3に示したデンプン及び魚肉ペーストの比熱も水分量と温度に依存した。デンプンには50~60、魚肉ペーストには60~70の温度域でピークが存在したが、これらはそれぞれデンプン糊化、タンパク熱変性による吸熱に起因するため、この間の比熱をDSC法で測定するのは困難と考えられる。

図4に示した熱伝導率も温度及び水分量に対する依存性が認められた。水分量の多い魚肉ペーストに比較して、糊化前のデンプンは低温域の変化が顕著であった。

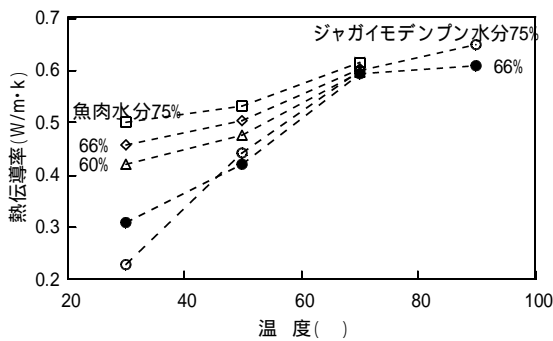


図4 デンプン及び魚肉ペーストの熱伝導率

### 3.2 デンプン含有魚肉ペーストの加熱試験及びシミュレーション

デンプンを含む魚肉ペーストの加熱試験における各部の温度経過を図5に示した。温度上昇の速度は各部で大きく異なり、外壁から5mm間隔の各測定点がデンプンの糊化温度(50)に到達する時間はそれぞれ2分程度ずつ遅れ、中心部では6分程度の遅れがみられた。各部の温度分布は25分後まで存在した。

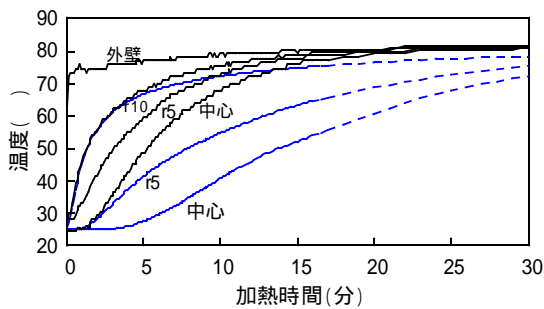


図5 加熱試験( )及びシミュレーション解析(····) 円柱半径14.5mm, r5:中心から7.5mm, r10:同12.5mm

50分間加熱した後の各部水分を表1に示した。外層から内層にかけて水分分布が生じ、最外層部

の水分は糊化前よりも多く、中心部は少なかった。これは先に糊化温度に到達した外層部のデンプン粒が周囲の魚肉ペーストから吸水して膨潤したために低水分状態となったタンパク質組織に内部から水分が移動した結果と考えられる。各部で糊化温度に到達する時間に差があるためにこのような水分分布が生じたものとみられ、加熱工程が食品の品質に影響を与えた具体例と言える。

表1 円柱状試料各部の加熱後水分

	水分% (水分/乾量)
加熱前	64.6 (1.825)
加熱後 中心~5mm	52.8 (1.123)
5~10mm	57.9 (1.375)
10~14.5mm	68.5 (2.175)

加熱試験と同条件でコンピュータシミュレーションを行った結果を図5に示した。各部の温度上昇は加熱試験の場合と同様に内部ほど遅れる傾向を示した。しかし、中心部の昇温は加熱試験よりも著しく遅れた。

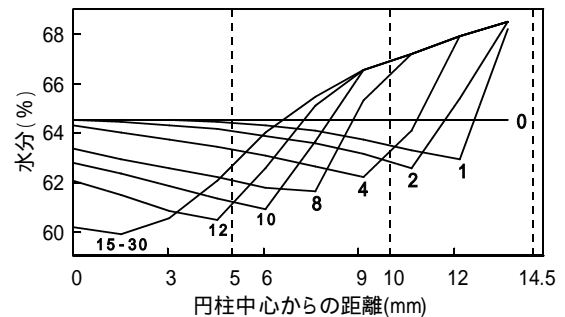


図6 加熱過程における水分分布の解析結果 添数字は加熱時間(分)

加熱過程における水分分布のシミュレーション結果を図6に示した。加熱開始直後、外壁付近では水分量が増加し、これに内接する層では水分が低下した。水分が低下した位置は加熱に伴い低下量を増大させながら中心に向かって移動し、最終的に外層部では初期より高水分となり、中心部では低水分となった。この変化は表1に示した加熱後の水分分布と符合し、デンプンの糊化時吸水によって水分の不均質化が生じることをシミュレーションにより予測できることを示した。水分分布は固形あるいはゲル状食品の力学特性に強く影響

し食感などの品質を左右するため、熱処理加工における水分分布の予測は省エネルギー化などの技術開発において重要な鍵となる。しかし、現状では熱移動、水分移動の予測値にズレがあるため、今後、より正確な解析を行うための改良が必要である。

#### 4. まとめ

デンプン及び魚肉ペーストの熱物性を測定し、原料配合条件をもとにコンピュータシミュレーションを行うことにより加熱過程における熱及び水分移動の推定を試みた。その結果、食品加工技術の開発において品質への影響を予測する手段として利用可能なことが示された。

#### 謝 辞

本研究の遂行に際してご指導いただいた東京大学大学院 宮脇長人助教授に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 渋川祥子：食品加熱の科学(朝倉書店、東京)
- 2) 矢野俊正、桐栄良三 監修、岡崎守男、渡辺尚彦、赤尾 剛著：「食品工学基礎講座<5>」加熱と冷却(光琳、東京)
- 3) 財団法人省エネルギーセンター - 編：「工場の省エネルギー推進のてびき」
- 4) 矢野俊正、桐栄良三 監修、小林登史夫、大久保行真、後藤祐二、矢野卓雄、高崎光信 著「食品工学基礎講座<12>」食品システム論、第4章省エネルギー管理(光琳、東京)
- 5) 日本熱物性学会編：熱物性ハンドブック(養賢堂、東京)
- 6) O. Miyawaki and R. Pongsawatmanit: Mathematical analysis of the effective thermal conductivity of food materials in the flozen state, Biosci. Biotech. Biochem., 58(7), 1222(1994)