

平成30年6月19日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00777

研究課題名(和文) 澱粉茹で調理の環境負荷低減を実現する流体解析に基づく水分移動モデルの構築

研究課題名(英文) Construction of moisture transfer model based on fluid analysis aimed at reduction of environmental burden of cooking of starchy food

研究代表者

福岡 美香 (FUKUOKA, MIKA)

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：10240318

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：麺の茹で調理は長い調理時間と多量の熱エネルギーを必要とし、その低減が期待されている。本研究では、鍋内の流れが麺の水分移動、澱粉糊化に及ぼす影響を明かにし、水分移動を記述できる数学モデルを構築することを目指す。顕微鏡画像のRGBをL\*a\*b\*へ変換するCVS法によって、澱粉の状態分布を明確に表せた。水分移動、糊化ともに流れによって促進されることが、MRI法とCVS法によって示された。熱・物質移動解析を行った結果、調理途上の水分移動は、麺表面から内部へと変化する澱粉の状態に応じた水分保持能力が支配要因であり、澱粉の保水能力と実際の含水率との比の勾配を駆動力とした数学モデルが適用できると言えた。

研究成果の概要(英文)：Cooking of starch food such as noodles and rice requires long cooking time and a large amount of heat energy, so it is expected to reduce this. In this research, we aim to establish a mathematical model that can describe moisture transfer by clarifying the influence of flow in the pot on moisture transfer and starch gelatinization in noodles. The state of starch gelatinization in noodle could be clearly observed by adopting the CVS method which converts the RGB value of the image taken by the microscope into the CIE L\*a\*b\*. It is shown by application of MRI method and CVS method that both moisture transfer and gelatinization are promoted by flow. Based on the experimental results, heat and moisture transfer analysis by finite element method were carried out. The mathematical model in which the ratio between the water holding capacity and the actual moisture content is defined as the driving force was applicable to describe the moisture migration during noodle cooking.

研究分野：食品工学

キーワード：澱粉食品 茹で調理 水分移動 流れ 糊化 分散 MRI

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、澱粉食品の中でも特に多量の熱エネルギーを必要とする麺類の茹で調理に着目し、熱および水分の供給源となる茹で水の挙動が、麺内部への水分移動と澱粉糊化におよぼす影響について明らかにすることで、麺内部の糊化および水分移動を速やかに進行させる条件を提示することを目指した。これまでの研究から、麺類の茹で調理において、澱粉の糊化反応の後期段階における高分子分散とさらに麺表面からの高分子断片の溶出が、水分移動に大きく関与していることが示されている。ここでは、これらの結果を提示するとともに、適切な数学モデルの構築を目指した。

## 2. 研究の目的

茹で調理途上の麺内部の澱粉の糊化状態を、顕微鏡にコンピュータービジョンシステム (CVS) を取り入れて呈示するとともに、水分移動の支配要因を検証し、適切な水分移動モデルを構築することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### 3-1. 試料および調理実験

乾麺スパゲティ (含水率 7.2% wet basis) を用いた。業務用ガスコンロ及びステンレス寸胴鍋 ( $\phi 240\text{mm} \times H 240\text{mm}$ ) を用い、内輪外輪共に 100% の出力で麺を茹でる条件を「流れあり」、外輪 100% 内輪 0% の出力で中央に設置した 1L ビーカーで麺を茹でる条件を「流れなし」と定義した。「流れあり」の条件において、麺の移動速度を粒子追跡法によって求めた結果、 $8.705\text{ cm/s}$  (SD 0.796) であった。

### 3-2. 水分分布測定

NMR 装置は Bruker biospin (株) 製, Avance 400 ( $^1\text{H}$  共鳴周波数 400 MHz, 磁場強度 9.4 T) ワイドボアタイプ・マイクロイメージングアクセサリ付を使用した。RF コイル径 30 mm を使用し、繰り返し待ち時間 (TR) 3000 msec、エコー時間 (TE) 2.979

msec、マトリックスサイズ  $256 \times 256$ 、積算回数 2 回の条件で、マルチエコー法により各ボクセル ( $0.084\text{ mm} \times 0.084\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$ ) の横緩和時間  $T_2$  の分布を求めた。

また、50.0、60.0、70.0 及び 80.0°C で吸水処理した均一系試料をプラスチックフィルムで巻いて閉鎖系にし、100°C 下で加熱したものを上記の条件で MRI の測定を行った。得られた  $T_2$  の平均値と含水率の関係を検量線とし、茹で調理試料の  $T_2$  分布を含水率分布へ変換した。

### 3-3. 顕微鏡を用いた麺内の糊化状態の観察およびコンピュータービジョンシステム (CVS) を利用した澱粉の状態変化の定量化

OCT compound (Sakura Finetek Japan Co.) に試料の軸方向の中心部約 20 mm を投入し、 $-30^\circ\text{C}$  に設定したショックフリーザー内で急速凍結した。その後、 $-20^\circ\text{C}$  に設定したクライオスタット (CM1500、Leica Microsystems) を用いて、 $10\ \mu\text{m}$  の厚さの切片を作製した。また、別途、 $1.0 \times 10^{-3}\text{ mol/L}$  に調製したヨウ素溶液 200 mL に、作製した切片スライドを 3 分間浸漬し、蒸留水で水洗した後、十分に乾燥させた。

これら 2 種類の切片について、光学顕微鏡 (オリンパス (株), BX50F4) を用いて観察を行い、顕微鏡用デジタルカメラ (Digital sight DS-5M, Nikon Co.) で撮影を行った。一方は、偏光顕微鏡下、クロスニコルで観察することで糊化の有無を確認した。20 倍の接眼レンズと 2 倍の対物レンズで観察を行い、デジタルカメラのシャッター速度は 0.5 秒で撮影を行った。他方、染色した切片は、オープンニコルで観察することで、高分子の分散の有無を確認した。20 倍の接眼レンズと 2 倍の対物レンズ、シャッター速度 1/250 秒及び、20 倍の接眼レンズと 10 倍の対物レンズ、シャッター速度 1/40

秒の二つの条件で撮影を行った。

撮像した画像について、麺の軸方向に対する断面の中心点を通るように、横 100 ピクセル×縦分をトリミングし、*sRGB* を取得した。*sRGB* は *CIE RGB* から変換する際、 $\gamma$ 補正(1/ $\gamma$ 乗)し、それを 255 倍することでデジタル段階としている事から、まず(4)式を用いて *CIE RGB* への変換を行う。

$$R = \left(\frac{R_s}{255}\right)^{2.2}, G = \left(\frac{G_s}{255}\right)^{2.2}, B = \left(\frac{B_s}{255}\right)^{2.2} \quad (4)$$

本研究で用いる光源は *D65* のため、(5)式を用いて *CIE RGB* を *XYZ<sub>D65</sub>* に変換した。

$$\begin{bmatrix} X_{D65} \\ Y_{D65} \\ Z_{D65} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4125 & 0.3576 & 0.1804 \\ 0.2127 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9503 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (5)$$

*XYZ<sub>D65</sub>* に変換後、Bradford matrix transform((6)式)を用いて *CIE XYZ* へと変換した。

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0098 & 0.007 & 0.0128 \\ 0.0123 & 0.9847 & 0.0033 \\ 0.0038 & -0.0072 & 1.0892 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_{D65} \\ Y_{D65} \\ Z_{D65} \end{bmatrix} \quad (6)$$

最後に、(7)、(8)式を用いて *CIE XYZ* を *L\*a\*b\** へと変換する。ここで用いた *X<sub>n</sub>*, *Y<sub>n</sub>* 及び *Z<sub>n</sub>* はそれぞれ、0.973, 1.000 と 1.161 を使用した。

$$f_x = \begin{cases} (X_C / X_n)^{1/3} & \text{at } X_C / X_n > 0.008856 \\ 7.787 \times (X_C / X_n) + 16/116 & \text{at } X_C / X_n \leq 0.008856 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_y = \begin{cases} (Y_C / Y_n)^{1/3} & \text{at } Y_C / Y_n > 0.008856 \\ 7.787 \times (Y_C / Y_n) + 16/116 & \text{at } Y_C / Y_n \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$f_z = \begin{cases} (Z_C / Z_n)^{1/3} & \text{at } Z_C / Z_n > 0.008856 \\ 7.787 \times (Z_C / Z_n) + 16/116 & \text{at } Z_C / Z_n \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$L^* = 116 \times f_y - 16$$

$$a^* = 500 \times (f_x - f_y) \quad (8)$$

$$b^* = 200 \times (f_y - f_z)$$

### 3-4. DSC 測定による糊化度の定量

20.0、55.0、57.5、60.0、62.5、65.0、70.0、75.0、80.0 及び 85.0°C で等温吸水処理した均一系試料を、耐熱性ステンレス容器(Pkg1000, PerkinElmer)に充填し、DSC 装置 (Pyris1, PerkinElmer Inc.) を用いて 30-100°C の範囲を昇温速度 5°C/min で DSC

測定を行った。20.0°C で吸水した均一系試料の比エンタルピー  $\Delta H_0$  及び各均一系試料における比エンタルピー  $\Delta H_n$  から、(9)式を用いて糊化度を算出した。

$$\text{糊化度} (-) = 1 - \Delta H_n / \Delta H_0 \quad (9)$$

### 4. 研究成果

はじめに、MRI 法によって乾麺内の水分分布を測定した結果を Fig. 1 に示した。鍋内の流れがある系では、麺中心部まで水分移動が進行している様子がわかる。

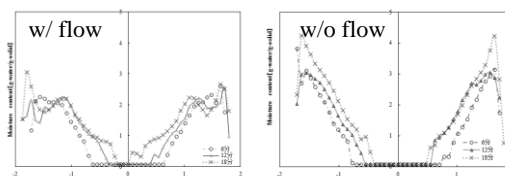


Fig.1 MRI による水分分布測定  
さらに、乾麺の偏光顕微鏡画像 (Fig. 2) から、CVS 法によって、抽出した *L\** 値の 1 次元分布を Fig. 3 に示した。

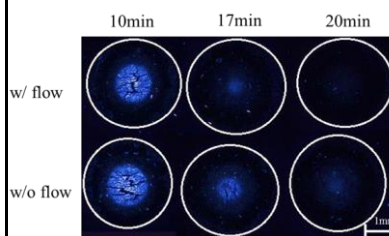


Fig.2 乾麺の偏光顕微鏡画像

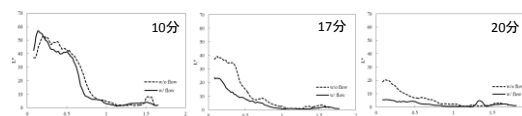


Fig.3 乾麺の *L\** 値分布の変化

均一系試料について、顕微鏡法と CVS 法で決定した *L\** 値と、別途、DSC 法によって測定した糊化度との関係を Fig.4 に示した。

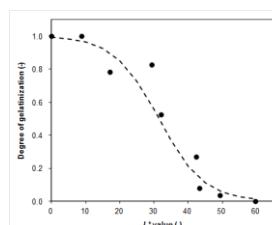


Fig.4 均一系試料による *L\** 値と糊化度の関係

ここで示した曲線は、次の経験式で表される。

$$X_g = \frac{1}{1 + 8.34 \times 10^{-3} \exp(0.152L^*)} \quad (10)$$

この関係を用いて、Fig.3 に示した乾麺の

茹で調理途中の L\*値分布を糊化度へ変換した結果を Fig.5 に示した。流れがある系において、内部への糊化の進行が速い事が明確に示されている様子がわかる。

次に、Fig.6 に示したヨウ素染色画像について CVS 法で変換した b\*値の分布を Fig.7 に示した。

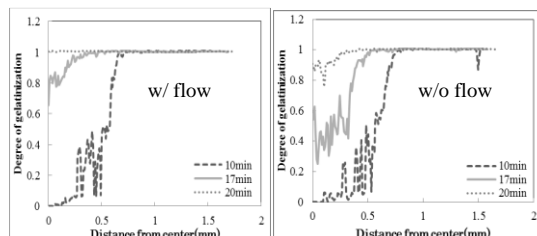


Fig.5 CVS 法による糊化度解析結果

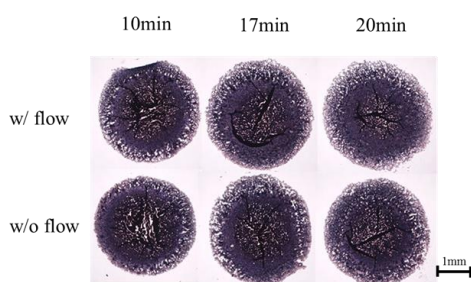


Fig.6 乾麺のヨウ素染色画像

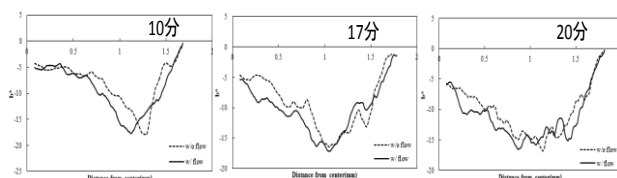


Fig.7 乾麺の b\*値分布

b\*値の分布は、表面から麺の中心に向かってV字型を示しており、中間領域の b\*が最も低い値となった。茹で調理の進行に伴って、V字型の谷の部分が麺中心部へと移動する様子が示された。この部分は、澱粉糊化の後期段階に相当する高分子の分散開始点と考えられる。流れの有無によって分散開始点の位置が変化することが示唆されたが、その差はわずかであると言える。

次に、有限要素法による二次元円筒形での熱伝導及び水分移動解析を行った。熱伝導解析にはフーリエの法則に基づく熱伝導方程式(10式)を用いた。水分移動解析は、渡辺ら[1]の提案した相対含水率モデルを

参考にした矢部ら[2]のモデルを適用、修正することとした。デンプンの上限含水率  $W^+$  と実際の含水率  $W$  との比の勾配を駆動力とする式(11)を用いた。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( kr \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} -\rho_s \frac{\partial W}{\partial t} = & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_w W^+ r \rho_s \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{W}{W^+} \right) \right) \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left( D_w W^+ r \rho_s \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{W}{W^+} \right) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

上限含水率  $W^+$  は、デンプンの状態に依存するが、矢部ら[2]のモデルに従い、糊化初期段階と、分散過程での上限含水率との関係式 (11) 式、(12) 式を、それぞれ計算に組み込んだ。矢部ら[2]は、拡散係数  $D_w$  に関して Gomi ら[3]が求めた米デンプン/水系内での含水率と温度の関数によって得られる水の拡散係数を用いた((13)式)が、本研究では、この値が妥当であるか検証するために、拡散係数の値を変化させて解析を試みた。

$$W^+ = 0.4069 \log(F_c) + 2.5802 \quad (11)$$

$$W^+ = 0.004 \exp(6.012 X_d) + 2.5802 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} D_w = & \exp\{\log D_{w1} \cdot (1.0 - F_c) + \log D_{w2} \cdot F_c\} \\ D_{w1} = & 0.127 D_{wf} \left( \frac{W}{1+W} - 0.33 \right) \\ & \cdot \exp\{778/(T + 273)\} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} D_{w2} = & D_{wf} \{1.31 \cdot W / (1+W) - 0.486\} \\ D_w = & 0.0232 \exp\{-2070/(T + 273)\} \end{aligned}$$

初期条件は  $T_0=20$  (°C)、 $W_0=0.11$  (kg-water/kg-solid)とした。さらにMRIの結果から、茹で調理における表面含水率が 2.5 kg-solid/kg-sample であるため、この含水率を境界面の含水率( $W_0$ )とし、境界面における表面供給水速度を  $1.4 \times 10^{-5} (W_0 - W)$  kg  $m^{-1} s^{-1}$ とした。既往の文献より、密度  $\rho$ : 1.5 kg  $m^{-3}$ 、比熱  $C_p$ :  $1.92 \times 10^3$  J  $kg^{-1} K^{-1}$ 、熱伝導率  $k$ :  $2.16 \times 10^{-1}$  W  $m^{-1} K^{-1}$  を使用し計算を行った。

調理進行に伴うデンプンの状態変化の記

述は、デンプンの糊化及び高分子分散の速度式が一次反応系であると仮定し、(14)式及び(15)式を用いた。糊化度は温度及び含水率に依存するため、温度に応じた終末糊化度(TEG)[4]を計算に加えた(16)式。TEGに対する糊化度を $X_g$ 、糊化完了に対する糊化度を $F_c$ とした。さらに糊化完了後に高分子の分散が生じると仮定した。

$$\frac{dX_g}{dt} = -k_1 X_g$$

$$F_c = \text{TEG}(1.0 - X_g) \quad (14)$$

$$\frac{dX_d}{dt} = k_2 X_d \quad (\text{at } F_c = 1.0) \quad (15)$$

$$\text{TEG}(W, T) = \frac{3.15W / (1+W) - 0.946}{1 + \exp\{-0.179(T - 69.1)\}} \quad (16)$$

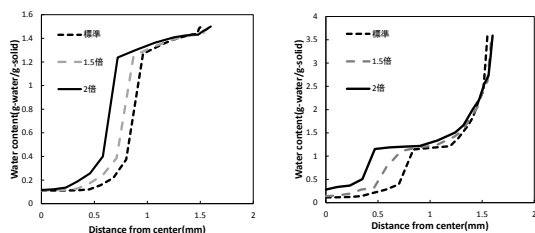
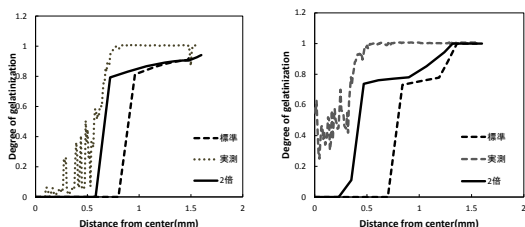


Fig.8 茹で時間 10 分 (上左)、17 分 (上右) における水分分布の解析結果

Fig.8 に示した解析結果から、拡散係数を修正することで、内部への水分移動が促進され、より実測値へ近づく様子が示された。さらに糊化度分布の解析結果を Fig.9 に示した。糊化度の分布も拡散係数の修正によって、麺中心部での糊化度の上昇が見られ



る実測値へ近づく様子が示された。しかしながら、17分における表面部分の水分分布は、実測値とは異なることから、本モデルで使用した上限含水率の関数を見直す必要があると言える。

Fig.9 茹で時間 10 分 (左)、17 分 (右) に

おける糊化度分布の解析結果と実測値

#### 参考論文

- [1]渡辺尚彦, 八幡淑子, 福岡美香, 崎山高明, 三堀友雄; 「多相不均一系に適用できる拡散方程式: 相対含水率モデル」, 日本食品工学会誌, **7** (2006) 129-139.
- [2]矢部晋太郎, 福岡美香\*, 酒井昇: スパゲティ茹で調理の水分移動に影響を及ぼすデンプンの構造変化, 熱物性, **26**(4), 179-186(2012).
- [3]Y. Gomi, M. Fukuoka, S. Takeuchi, T. Mihori, H. Watanabe; “Effect of temperature and moisture content on water diffusion coefficients in rice starch/water mixtures”, Food Sci. Technol. Int., **2** (1996) 171-173.
- [4]M. Fukuoka, K. Ohta, H. Watanabe, Determination of the terminal extent of starch gelatinization in a limited water system by DSC. J. Food Eng., **53**(1), 39-42(2002).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

福岡 美香 (FUKUOKA MIKA) ・ 東京海洋大学 ・ 学術研究院 ・ 准教授  
研究者番号: 10240318

##### (2) 研究分担者

酒井 昇 (SAKAI NOBORU) ・ 東京海洋大学 ・ 学術研究院 ・ 教授  
研究者番号: 20134009