

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500939

研究課題名(和文) 茹で調理の環境負荷低減へむけたデンプン食品の水分移動に及ぼす流体挙動の解析

研究課題名(英文) Analysis of fluid behavior on the moisture migration of starch foods towards reducing the environmental impact during cooking

研究代表者

福岡 美香 (FUKUOKA, MIKA)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・准教授

研究者番号：10240318

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、環境負荷の大きい麺などのデンプン食品の茹で調理の負荷低減を実現する為の基礎研究であり、デンプン食品の水分移動は糊化によって決まる水分保持能力(WHC)が支配因子であり、糊化デンプンの分散断片が系外へ流出することなく表層部に堆積するとWHCが過度に上昇して、内部への水移動速度の低下を引き起こす。しかしながら、麺と流体との相対速度が適当な条件では、分散断片が流れによって系外へ溶出し、沸騰温度未満かつ少ない湯量であっても、内部への水分移動が促進されるため、環境負荷低減が実現される。本研究では表面WHCと分散溶出へ及ぼす流体挙動を定量化し、水分移動への影響を明らかにすることを目的とする。

研究成果の概要(英文)：During cooking of noodle, starch gelatinization is preceded at the surface of the noodle strain because of its water rich environment. Since the water holding capacity (WHC) of starchy food depends on the degree of starch gelatinization, the surface regions of the noodle hold the most water. Consequently, it is not easy for water to migrate from the exterior to the interior of the noodle. If the excessive increasing of WHC at surface region of noodle could be suppressed, water migration to the inside of the noodle might be promoted. Moreover, it is expected that the surface WHC is strongly affected by the flow during cooking. Although it is said that the flow condition may affect the cooking of noodles, the quantitative evaluation of flow effect is scarcely. Our objective is to clarify the effect of flow on the water migration in starchy food during 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 流体解析 糊化 分散 MRI

1. 研究開始当初の背景

デンプン食品の中でもうどん、スパゲティを始めとした麺類の茹で調理過程は、熱移動と水分移動（吸水）が同時に起こり、それに伴ってデンプン顆粒の糊化が多段階に進行する。糊化進行に応じて、吸水性が増大して麺は膨潤し、さらに麺表面では、茹で水へと高分子が溶出する過程も進行する。そのため、調理メカニズムは極めて複雑で、内部への水分移動が律速となつて、可食に至るまでに長い調理時間を必要とする。この間、熱媒体となる多量の水を沸騰させ、調理中に温度を維持させるために、多くの熱エネルギーを必要とする。近年、調理時間を短縮させる目的で、内部をあらかじめ糊化させた麺の研究・開発や、噴流を利用して沸騰温度未満で茹で調理を行う調理機器なども市場に登場するなど、食材の改変から調理機器の開発まで、多面的な取り組みがなされている。一方で、食品産業においては、未だに温度や茹で時間、水の量、流れの状態などの調理の条件は、試行錯誤的に独自の指針が経験的に決められているのが現状である。

これまで申請者は、デンプン食品の水分移動が、フィックの拡散法則では説明し難い、多相不均一系で進行する水分移動であることを示した[参考文献 1-4]。さらに、糊化度を制御することで、麺の茹で時間を短縮できることを実験的に示し、糊化度を制御する手法としてマイクロ波加熱を適用した[参考文献 5]、[参考文献 6]。さらに、デンプン食品の水分移動は、糊化によって決まる水分保持能力(WHC)が支配因子であり、WHCが過度に上昇すると、糊化度が低くWHCが低いままの領域から、高い領域へ水分移動が生じることを明らかにしている[参考文献 7]。茹で調理では、特に、茹で水と接触する麺表面において、糊化が先行するためWHCが著しく上昇すると考えられるが、これを抑制するためには、糊化・分散した高分子断片が茹で水へと溶出する過程が必要であり、水の流れは重要な役割を果たすと予想される。

2. 研究の目的

上述の背景のもと、麺と流体との相対速度が適当な条件では、分散断片が流れによって系外へ溶出し、沸騰温度未満かつ少ない湯量であっても、内部への水分移動が促進されるという仮説に基づき、表面WHCと分散溶出へ及ぼす流体挙動を定量化し、水分移動への影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 試料および茹で調理実験

うどん（生および半生麺；含水率 20-30% wet basis）および乾麺スパゲティ（含水率 7.2% wet basis）を用いた。流体挙動の解析は、一定流量の温水を連続的に流す流路システム内での実験と、実際の調理を想定した鍋内での茹で実験の二つの系について行った。

① 流路システムを利用した茹で調理

流量と加熱温度を制御できる流路システム（Fig.1）を使用して、管内流れを規定した流路内試料固定部に麺を配置して調理実験を行った。尚、流体解析ソフト CFD2000 による解析を行い、円管内の流れの状態、すなわち試料近傍の流速分布を検証した。

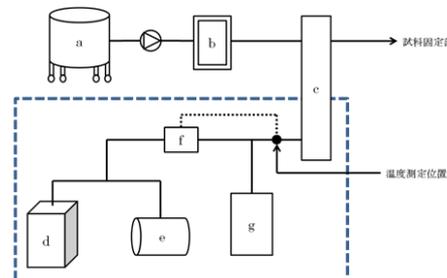


Fig.1A 円管ラインシステム構成図

a) 清水タンク, b) 流量計, c) プレート式熱交換器, d) ボイラー, e) コンプレッサー, f) 温度制御部, g) 熱水ポンプ

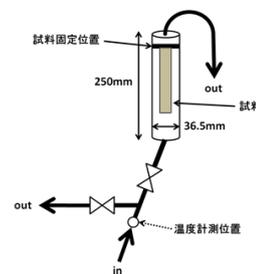


Fig.1B 試料固定部拡大図

② 鍋内茹で調理

業務用ガスコンロ及びステンレス寸胴鍋（φ240mm×H240mm）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。さらにこの2つの条件における麺の移動速度を粒子追跡法によって求めた。

(2) 水分分布測定：試料の上部、中心部、下部の約20mmを使用して、MRI測定を行なった。測定の際、試料表面から乾燥して水が試料外へ出るのを防ぐため、プラスチックフィルムで包装した状態で乾燥を防ぎながら、ガラス試料容器(外径30mmφ)に設置し、試料の軸方向に対して垂直断面の¹H画像を取得した。NMR装置にはBruker biospin K.K.製、Avance 400(¹H 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一付を使用し、RFコイル径30mmφ、

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 256×256、積算回数 2 回の条件で、マルチエコー法により、TE の異なる 16 枚の ¹H 信号強度画像から T₂ 分布を得た。各ボクセルサイズは 0.084×0.084×1.0 mm³であった。さらに事前に測定した較正曲線(生うどん(1)式、乾麺パスタ(2)式)を用いて T₂ 分布を含水率分布 w_c へと変換した。

$$w_c = (T_2 + 0.655) / 16.411 \quad (1)$$

$$w_c = (T_2 - 7.566) / 9.082 \quad (2)$$

(3) 固形分溶出率測定

茹で途上の麺試料を取り出し、氷水で 30 秒急冷した後、表面の水分をキムワイプで拭き取った。乾燥重量法を用いて(3)式に従って固形分溶出率を算出した。

$$\text{固形分溶出率 (\%)} = (B - A) \times A \times 100 \quad (3)$$

A:茹で後固形分量(g)、B:茹で前固形分量(g)

(4) 顕微鏡法によるデンプン構造変化の評価

OCT compound(Sakura Finetek Japan Co.)に試料を入れ、その中に、試料の軸方向の中心部約 20 mm を投入し、-30°C に設定したショックフリーザー内で約 15 分間急速凍結した。その後、-20°C に設定したクライオスタット (CM1500, Leica Microsystems)を用いて、10 μm の切片を作製した。また、Cunin et al. (1997) [参考文献 8]の染色方法を参考に、ヨウ素溶液による染色を行った。

顕微鏡観察は二種類の方法で、光学顕微鏡(BX50F4, Olympus Co.)を用いて観察し、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、染色処理を施していない切片を 2 枚の偏光板の間に入れ、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。他方は、染色した切片を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。

4. 研究成果

4. 1 円管流路システムでの茹で調理

①円管流路システムにおける茹で実験と流れの解析

Fig.1 に示した流路システムはボイラーからの蒸気を静水タンクから供給される水へ混合し温水を作る。本研究では 茹で調理

を対象としているため、本来ならば流体温度は 100°Cであることが望ましい。しかしながら、流路内に 100°Cの沸騰水を流すと、気泡が不連続に発生し、試料固定部において流体の流速が不定期に変動するといった問題が発生した。そのため流体温度は 90°Cとすることで、一定温度かつ安定した流速条件下での茹で調理が実現できた。流量を変化させて 1.59、4.78、7.97cm/s の異なる平均流速で実験を行った。尚、平均流速は、流量計から読み取った値と、試料部円管の断面積から求めた。また、流路内の流れを停止させ、かつ試料固定部の温度が 90°Cを維持できるように試料部円管にリボンヒーターを設置して流速 0m/s の状態を実現した。

上述で求めた流速下、Fig.2 に示すように試料部をモデル化した領域における流れの状態を流体解析ソフト CFD2000 によって解析した。

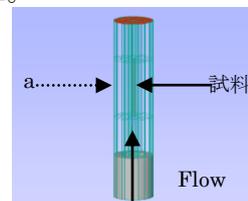


Fig.2 CFD2000 における解析モデル

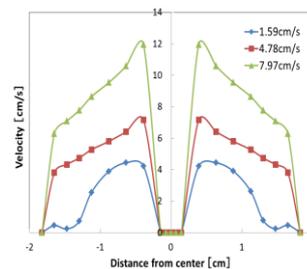


Fig.3 CFD2000 による解析 (Fig.2a 部分)

90°Cでの各平均流速におけるレイノルズ数 (Re) を算出した結果、4.78cm/s と 7.97cm/s では乱流である (Re=5352 (4.78cm/s)、Re=8899 (7.97cm/s))。

Fig.3の CFD2000による解析結果は、Fig.2 に示した a 地点 (試料高さ中央部) における試料から円管壁までに形成される流速分布である。解析結果から、試料近傍から管壁へ向けて不均一な流速分布が形成される様子が示された。特に平均流速が最大の 7.97cm/s では試料表面では、この値を超える約 12cm/s という高い値を示すことが明

らかになった。

②円管流路システムによる茹で実験における麺の品質評価

上述の流路システムに試料(半生うどん)を設置し異なる流速条件で茹で実験を行った。MRI法により各流速(0、1.59、4.78、7.97cm/s)で所定の時間茹でた試料(半生うどん)の T_2 分布を測定後、(1)式の検量線から含水率を算出し、試料内の水分分布を比較したものをFig.4に示した。

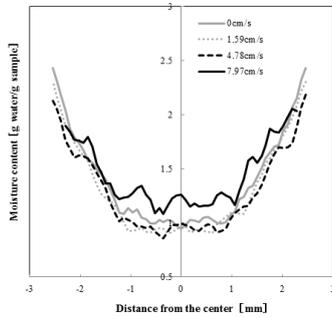


Fig.4 MRI法によって測定した茹で時間15minにおける麺内の水分分布

最大流速では、麺内部まで水分移動が進み含水率が上昇している様子が明らかであるが、これ以外の流速条件ではいずれも内部の含水率は増加せず、麺表面において高い含水率となることが明らかになった。また、流速0m/sにおいては、麺表面の含水率が最も高い値を示した。

さらに茹で実験途上における固形分溶出量の変化をFig.5に示した。

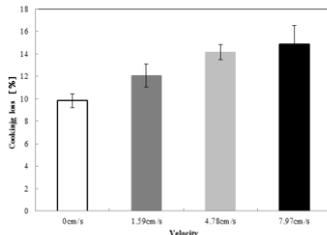


Fig.5 異なる流速条件下で15min茹でた麺の固形分溶出量

固形分溶出量は、流速が大きくなるに従って増加した。麺構造は、グルテン等が形成する基本骨格(ネットワーク)があり、この骨格の隙間を埋めるように澱粉顆粒が存在すると見立てられる。糊化初期(結晶構造の消失)から高分子断片が分散していく糊化後期過程が開始すると水分保持能力は著しく増大するが、麺表面においては、系外である茹で水中へ流出(溶出)すると考えられる。系外の流れが大きいほど、こ

の現象が促進され固形分溶出量の増加に繋がったと推察された。顕微鏡法を用いて麺内の澱粉顆粒の構造を可視化した。Fig.6に流速0cm/sならびに7.97cm/sで15min茹でた麺の顕微鏡写真をFig.6に示した。

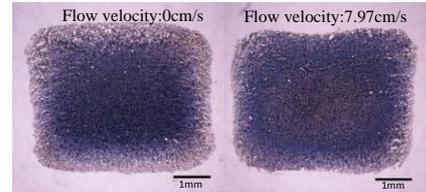


Fig.6 異なる流速条件下で15min茹でた麺のヨウ素染色光学顕微鏡写真

澱粉をヨウ素溶液と反応させると、アミロース鎖の長さに応じ、異なる色に呈色することが知られている。Fig.6では中間領域から表面で、濃い青紫色から薄い青紫色、及び薄い青紫色から薄いピンクへと色のグラデーションが見られた。これは表面に行くにしたがって高分子断片が分散していくことによるものであるが、流速が大きくなる程、系外への流出が増大するため分散領域が少なくなるという結果に相当する。

上述の水分分布、固形分溶出量、澱粉顆粒の状態観察の結果は、系外への澱粉高分子流出によって内部への水分移動が促進されるという水分移動モデルを支持する結果である。流れの解析から、円管流路システムにおいて流速7.97cm/s程度(CFDの解析結果から麺近傍では12cm/s)の流れの状態において、内部への水分移動が速く、これに満たない流れでは、表面における水分保持能力の上昇が大きく内部への水分移動が遅延するという結果が示された。

4.2 鍋茹で調理

試料に生麺うどん(恐るべき讃岐うどん、宮武讃岐製麺所(株))を用いて、粒子追跡法によって求めた鍋内の麺の移動速度は $8.7 \pm 0.796(\text{cm/s})$ であった。一方、鍋内に設置したビーカー内において麺が移動する様子は見られず、この状態を流れの影響を受けない場合とした。

Fig.7に鍋内の流れがある状態と流れの影響を受けない状態とで麺を茹でた時の偏光顕微鏡画像の結果を示した。図中、輝度の明るい領域は、複屈折性を示していることから、澱粉顆粒が未糊化の状態にあると言える。流れの影響の有無で内部の未糊化領域は大きく異なり、流れがある場合にお

いて内部の糊化が速く進行する様子が示された。

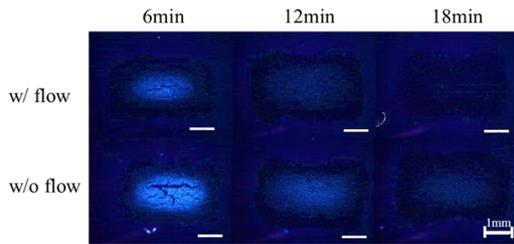


Fig.7 異なる茹で時間の麺の偏光顕微鏡による観察 (w/flow; 麺の相対移動速度 8.7cm/s, w/o flow; 0cm/s)

次に固形分溶出量の結果を Fig.8 に示した。固形分溶出量は茹で時間 10 分より、流れの有無で大きく異なる挙動を示した。

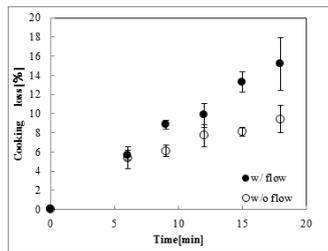


Fig.8 鍋茹で実験における麺固形分溶出量の時間変化

固形分溶出率は、流れの有無に関わらず時間経過と共に増加するが、流れありの方が固形分の溶出が顕著であった。

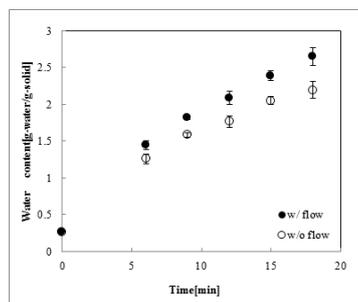


Fig.9 鍋茹で実験における麺の平均含水率の変化

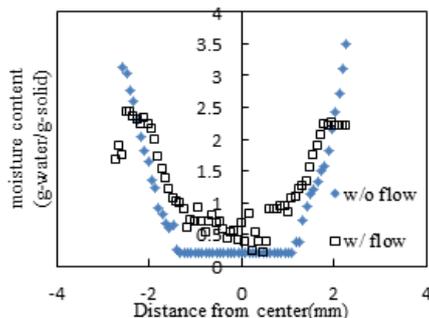


Fig.10 鍋茹で実験における麺の水分分布

(茹で時間 18 分)

次に平均含水率の経時変化を Fig.9 に、MRI 法によって測定した水分分布を Fig.10 に示した。流れの影響を受けた場合は、麺の中心部の水分量が増加している様子がみられた。これに対して流れの影響を受けていない場合は、内部の水分量は増加せず、麺表層部においてのみ水分量が著しく上昇していることが明らかになった。平均含水率においても、流れがある系では、流れの影響を受けない場合に比べ含水率の上昇が大きいという結果が得られた。

この傾向は茹で時間・麺の種類に関わらず現れた。Fig.11 は、スパゲティを試料として鍋調理を行った場合の偏光顕微鏡画像を示しているが、生うどん麺の調理と同様に、流れの影響を受けた場合の方が麺内部の糊化進行が速いという結果が明確に示されている。

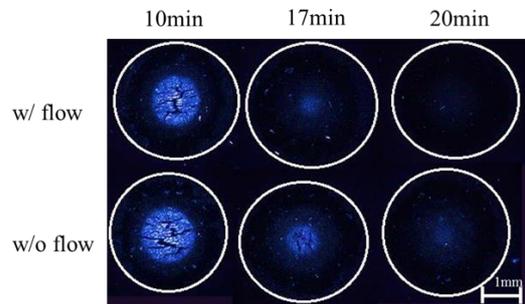


Fig.11 異なる茹で時間における乾麺(スパゲティ)の偏光顕微鏡による観察

MRI によるスパゲティ内の水分分布測定においても、流れの影響ありにおいて麺中心部まで水分移動が速やかに進行している様子が観察された。

デンプンは水分が十分に存在する系において糊化・分散・溶出という過程を辿る。分散過程のデンプンは水分を多量に保持することが出来ることがわかっており、糊化・分散を考慮に入れた数学モデルによって煮熟調理における麺内部への水分移動を説明できた[参考文献 8]。

円管内、鍋内ともに流れありの場合には、この分散過程のデンプンが茹で水の流れによって多く溶出することで、麺の表層部の水分保持能力が弱くなり麺の中心部まで水分が移動することが明確に示された。ただし、麺内部への迅速な水分移動を実現するためには麺が茹で水中、留まることなく動ける程度の流れが必要であり、今回の実験

では、平均相対速度 7.97cm/s 程度（麺表面では 12cm/s）の流れが必要であることが示された。また、糊化・分散・溶出を考慮した水分移動のモデルと流れの影響は、麺の種類に因らず澱粉食品の煮熟調理において共通に適用できることが明らかになった。

<引用文献>

- ① H.Watanabe, Y.Yahata, M.Fukuoka, T. Sakiyama and T. Mihori. The thermodynamic basis for the Relative Water Demand Model that describes non-Fickian water diffusion in starchy foods. J. of Food Eng., 83,130 – 135(2007).
- ② Thammathongchat, S., Fukuoka, M., Hagiwara, T., Sakiyama, T. and Watanabe, H. Water holding capacity profile that governs water migration in starchy food during boiling. Jap. J. Food Eng., 8(3), 131-136(2007).
- ③ 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, 129-139 (2006) .
- ④ Watanabe, H. , Fukuoka, M., Tomiya, A. and Mihori, T. A new non-Fickian diffusion model for water migration in starchy food during cooking. J. Food Eng., 49, 1-6(2001).
- ⑤ Xue C., Sakai N., Fukuoka M., Prediction of the degree of starch gelatinization in wheat flour dough during microwave Heating, J. Food Eng., 97, 40-45 (2010).
- ⑥ Xue C., Sakai N., Fukuoka M. Use of Microwave Heating to Control the Degree of Starch Gelatinization in Noodles. J. Food Eng., 87(3), 357-362 (2008).
- ⑦ Yahata, Y., Fukuoka, M., Mihori, T. and Watanabe, H. Water can be made to diffuse against the water content gradient in starchy foods. J. Food Eng., 76, 490-499(2006).
- ⑧ Cunin, C., Handschin, S., Walther, P., Escher, F., 1995. Structural changes of starch during cooking of durum wheat pasta. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie 28, 323-328.
- ⑨ 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).

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

- ① 大野真梨子, 福岡美香, 酒井昇, 麺の茹で調理に及ぼす鍋内流れの影響, 日本食品工学会第 15 回 (2014 年度) 年次大会講演要旨集, p.72 (2014 年 8 月 8 日-9 日).
- ② M. Fukuoka, Y. Kamiguchi, S. Yabe, N. Sakai, Effect of Flow on the Water Holding Capacity of Starchy Food during Cooking. 13th ASEAN Food Conference, Singapore (2013 年 9 月 9 日-12 日).
- ③ M. Fukuoka, Y. Kamiguchi, S. Yabe, N. Sakai, Flow Effect on Water Migration in Starchy Food during Cooking. FFOST Annual Meeting, France (2012 年 11 月 21 日-23 日).

[その他]

<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~fukuoka/>
食品熱操作工学研究室、
「ご飯、麺 一茹で調理の制御を目指せ」
FOOMA JAPAN 2011 アカデミックプラザ研究発表要旨集.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福岡 美香 (FUKUOKA MIKA)
東京海洋大学・海洋科学技術研究科・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・海洋科学技術研究科・教授
研究者番号：20134009