

令和 4 年 6 月 25 日現在

機関番号：34303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05918

研究課題名(和文) グルテンを含まない乾燥麺の復水過程の速度論的解析

研究課題名(英文) Kinetic analysis of rehydration process of gluten-free dried noodles

研究代表者

安達 修二 (Adachi, Shuji)

京都先端科学大学・バイオ環境学部・特任教授

研究者番号：90115783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：断面形状の異なる3種の乾燥でん粉麺の復水過程を測定し、その速度論的解析から、麺表面の境界膜における物質移動がグルテンを含まないでん粉麺の復水過程の律速段階であることを明らかにした。麺を茹でたのちに、過熱水蒸気乾燥または凍結乾燥すると、熱風で乾燥した麺より復水速度が速いことを示した。また、麺の形状のまま、麺のガラス転移温度を推定する新たな方法を開発した。さらに、復水したでん粉麺の膨潤圧を推定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乾燥小麦粉麺の復水過程は、復水に伴う麺内部でのグルテンネットワークの弛緩が律速段階であるが、乾燥でん粉麺の復水過程は、麺表面の境界膜における物質移動が律速であり、グルテンの有無により律速段階が異なることを明らかにした。また、麺のガラス転移温度や復水した麺の膨潤圧を推定する方法を開発した。さらに、茹で麺の乾燥法を工夫することにより、避難所などの熱水が使えない状況でも、常温の水で復水するでん粉麺が調製できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The rehydration processes of dried starch noodles with different cross-sectional shapes were measured, and the kinetic analysis of the processes indicated that the mass transfer through the boundary layer on the noodle surface was the rate-limiting step for rehydration of gluten-free starch noodles. It was shown that the superheated steam-dried or freeze-dried noodles of cooked starch noodles were rehydrated faster than the hot-air-dried ones. A novel method for estimating the glass transition temperature of noodle in its shape was also developed. Furthermore, the swelling pressure of rehydrated starch noodle was estimated.

研究分野：食品工学，調理科学，応用糖質科学，食品物理化学

キーワード：でん粉麺 グルテンフリー 乾燥麺 復水過程 速度論的解析 ガラス転移温度 膨潤圧

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

スパゲッティなどの乾燥小麦粉麵の復水（吸水）過程は、乾燥過程の裏返しで、水の拡散係数の含水率依存性を考慮した拡散方程式で記述できるとの考えが支配的であったが、復水に伴い乾燥したグルテンネットワークが弛緩する過程が律速段階であり、単なる水の拡散現象ではないことを明らかにしていた[1]。でん粉の糊化は比較的速い過程であるので、グルテンを含まないでん粉麵は、短時間で復水すると想像されるが、実際には、でん粉の起源や温度により、長時間しても喫食できるまでに復水しない現象を見出していた。しかし、その理由は不明であり、乾燥でん粉麵の復水過程を表現する速度式や律速段階に関する知見がほとんど得られていなかった。すなわち、乾燥麵の復水過程における水の移動機構に対する理解が十分ではなく、乾燥麵の復水過程で生起する現象に対する理解の深化が求められていた。

一方、災害時の避難所や宇宙船内のように熱水の利用が制限される状況では、常温の水で短時間に復水し、喫食できる乾燥麵の開発が望まれており、そのための基礎的な知見を得る必要があった。

2. 研究の目的

上述したように、乾燥でん粉麵の復水過程に関する速度論的研究は少ない。そこで、乾燥でん粉麵の種々の温度における復水過程を測定し、それらを表現する速度式と、速度式に含まれるパラメータの温度依存性などを求める。それらの結果を乾燥小麦粉麵のそれらと比較することにより、小麦粉麵を含む乾燥麵の吸水過程における水の移動機構の理解の深化を図る。また、小麦粉麵では乾燥条件が復水過程に影響を及ぼすので[2,3]、でん粉麵についても同様に、種々の方法で調製した乾燥麵の復水挙動について検討する。とくに、でん粉をほぼ完全に糊化した茹で麵の保存および乾燥条件を変えて、でん粉の老化度（糊化度）の異なる乾燥麵を調製し、それらの復水過程を測定することにより、常温の水で復水するでん粉麵を調製するための基礎的な知見を得る。小麦粉麵の乾燥や復水過程では、麵のガラス転移温度（ T_g ）が大切な役割を果たす[4]。 T_g は示差走査熱量分析（DSC）などにより粉体の状態で測定するのが一般的であるが、麵を粉体にする際に状態が変化する可能性があり、またDSCの装置は高価であるため、麵の形状のままに安価に T_g を求める方法を開発する。さらに、乾燥麵は復水すると膨潤するが、その際に膨潤圧が変化し、水の移動や平衡状態における呈味成分の分配（味付け）などに影響すると考えられるので、麵の膨潤圧を推定する方法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 断面形状の異なる3種のでん粉麵（写真1）のそれぞれを約4 cmの長さに切り、15 mL容のコニカルチューブに入れ、そこに約7 mLの水を加えて、定温（30~70°C）に保った恒温水槽で振盪しながら復水させた。適切な間隔で麵を取り出し、表面の水をぬぐったのち、恒量に達するように130°Cで2時間乾燥し、乾燥前後の重量から乾燥重量基準含水率 X [kg-H₂O/kg-d.m.] を求めた。また、振盪速度が復水速度に及ぼす影響についても検討した。

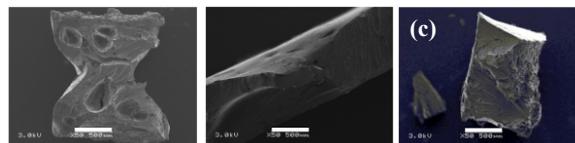


写真1 走査型電子顕微鏡で観察した3種のでん粉麵の断面画像

(2) 熱水中で茹で、でん粉を十分に糊化させたでん粉麵を直ちに熱風乾燥、過熱水蒸気乾燥および凍結乾燥により、乾燥でん粉麵を調製した。また、茹でたでん粉麵を冷蔵庫で保持する時間を変え、その後室温で減圧乾燥し、でん粉の老化度（糊化度）の異なる乾燥麵を調製した。それらの乾燥でん粉麵の30°Cおよび70°Cにおける復水過程を測定し、乾燥方法が復水挙動に及ぼす影響を検討した。

(3) 15 cmに切り揃えた乾燥麵を種々の飽和塩水溶液を入れたタイトボックスに入れ、1週間以上放置して平衡含水率の異なる麵を調製した。マントルヒーターで覆ったガラス瓶を水平に置き、シリコン栓で熱電対温度計と麵を水平に固定した。マントルヒーターを徐々に加温し、温度と麵の歪みの変化を測定し、麵が歪み始める温度を T_g とした。なお、平衡含水率は上記と同様に、130°C、2時間の乾燥前後の試料重量から求めた。

(4) 溶質（非電解質）のモル体積が圧力に依存せず、さらに部分モル体積をモル体積で代替できると仮定すると、モル体積 v の溶質が水溶液中で膨潤平衡に達したときの麵内部（麵相）と液相の溶質濃度の比である分配係数 K と麵の膨潤圧 Π は式（1）で関係づけられる[5]。

$$K = K_0 \exp(-\Pi v / RT) \quad (1)$$

ここで、 K_0 は液相と麵相における溶質の活動度係数の比と麵相の気孔率を反映するパラメータ、 R は気体定数、 T は絶対温度である。したがって、所定の温度で、モル体積の異なる溶質の分配係数 K を測定し、 $\ln K$ を v に対してプロットして得られる直線の勾配から膨潤圧 Π を推算した。

4. 研究成果

(1) 写真1(c)の断面が長方形に近い形状のでん粉麵の30°C~70°Cにおける乾燥重量基準含水率

X の経時変化（復水過程）を図1に示す。図1の復水過程は、いずれの温度においても、平衡含水率 X_{∞} と任意の時間 t における含水率 X の差を推進力とする式 (2) で表現できた。

$$\frac{dX}{dt} = k(X_{\infty} - X) \quad (2)$$

ここで、 k は復水速度定数である。復水過程のごく初期には、わずかではあるが、麺の表面付近に存在するクラックへの水の侵入に起因すると思われる急激な含水率の上昇 ΔX_0 が認められる。このことを考慮すると式 (2) に対する初期条件は次式で与えられる。

$$t = 0, X = X_0 + \Delta X_0 \quad (3)$$

ここで、 X_0 は麺の初期含水率である。式 (2) と式 (3) より、任意の復水時間 t とそのときの含水率 X の関係は式 (4) で表される。

$$\frac{X_{\infty} - X}{X_{\infty} - (X_0 + \Delta X_0)} = e^{-kt} \quad (4)$$

ΔX_0 は、初期過程の X と t の関係を $t \rightarrow 0$ に外挿することにより算出した。また、 X_{∞} と k は式 (4) による X の計算値と実測値の残差二乗和が最小になるように決定した。式 (4) は、写真1(a)と(b)に示す断面が X 字形および正方形に近い形状の乾燥麺のいずれの温度における復水過程にも適用できた[6]。

写真1(a)~(c)に示すいずれの乾燥麺の平衡含水率 X_{∞} も、50°Cと60°Cの間で大きく変化した。これは、これらの麺に含まれるでん粉の糊化温度がこの範囲にあることを示唆する。そこで、水の温度を一定の速度で上昇させたときの含水率の変化から糊化温度を推算する方法[7]を適用し、写真1(a)~(c)に示す乾燥麺の糊化温度はそれぞれ52°C、56°Cおよび53°Cと推定した。

小麦粉麺の復水過程は麺内部におけるグルテンネットワークの弛緩が律速段階であった。グルテンを含まない乾燥麺の律速段階が麺内部における水の拡散過程であるとすると、含水率 X を t/d_e^2 に対してプロットすると、麺の断面形状にかかわらず、すべてのでん粉麺で1本の曲線で表されるはずである。ここで、 d_e は麺の断面積を外周で除した円相当直径である。一方、麺外表面の境膜における水の物質移動が律速段階であるときには、含水率 X を ta_s に対してプロットすると、すべてのでん粉麺で1本の曲線で表されるはずである。ここで、 a_s は麺の比表面積である。なお、図2は70°Cにおける結果であり、写真1(a)~(c)に示す3種のでん粉麺に対するプロットが1本の線で表され、麺表面の境膜における物質移動が律速であることを強く示唆する。なお、シンボル○で表した結果が、後半で曲線から偏倚しているのは、茹で溶けに起因する。そこで、恒温水槽の振盪速度を変えて、写真1(c)のでん粉麺の復水過程(70°C)を測定したところ、振盪速度が速く境膜が薄くなるほど復水過程が促進され、上述の推測が妥当であることが検証された。

このようにグルテンを含む小麦粉麺とグルテンフリーのでん粉麺では、復水過程の律速段階が異なることが示された。

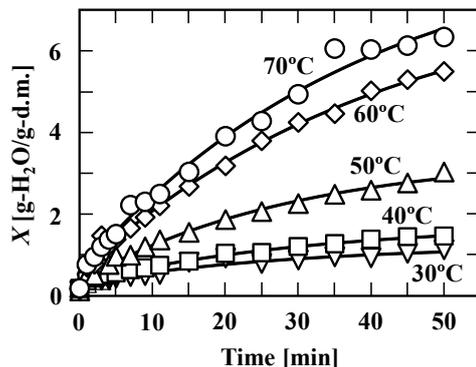


図1 乾燥でん粉麺(写真1のC)の種々の温度における復水過程

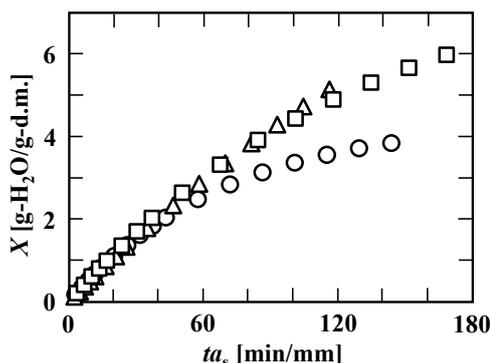


図2 麺表面の境膜における水の移動が律速段階であることを示唆するプロット。

(2) 熱水中で、でん粉を十分に糊化させたでん粉麺を種々の方法で乾燥した麺の30°Cおよび70°Cにおける復水過程を測定したところ、いずれの温度においても過熱水蒸気で乾燥した麺の復水が速く、平衡含水率が高い傾向にあった。この乾燥方法はα化米の製法と類似するため妥当な結果であろう。次いで、-80°Cで急冷したのちに凍結乾燥した麺の復水速度が速かった。70°Cにおける復水過程では、復水速度定数は乾燥方法に大きく依存したが、平衡含水率には大差がなかった。これは、70°Cがでん粉の糊化温度より高いため、妥当である。一方、でん粉の糊化温度より低い30°Cにおける復水過程では、復水速度定数と平衡含水率のいずれも乾燥方法に依存し、復水速度定数は-80°Cで急冷したのちに凍結乾燥した麺がもっとも大きかったが、平衡含水率は過熱水蒸気で乾燥した麺がもっとも高かった。したがって、条件についてはさらに検討する必要があるが、常温の水で復水して喫食できるでん粉麺の製造には、茹で麺を過熱水蒸気で乾燥する方法が適していると考えられる。

(3) 方法(3)で述べた麺の形状のまま T_g を求める方法は、まず T_g が既知のスパゲッティに適用した。温度の上昇過程において歪み始める温度から推定した T_g は、含水率の高い麺ほど低く、妥当な形状のガラス転移曲線が得られた。この曲線は、同一試料(スパゲッティ)を粉砕した粉末について、DSCにより測定したガラス転移曲線よりやや下に位置した。重力という機械的な要素が関与する条件で測定した転移温度は熱的な方法で求めた値よりやや低いといわれており、ここで得られた結果は妥当である。本法を他の乾燥麺の T_g の推算にも適用したが、DSCの結果

が得られておらず、継続して検討する予定である。なお、本法は DSC のように高価な測定機器を必要とせず、また麺の形状のまま測定できるのが利点である。

(4) モル体積の異なる複数の溶質 (4~8 種) を溶解した水溶液中ででん粉麺または小麦粉麺を復水させ、復水過程における各成分の分配係数 K を求め、 $\ln K$ を溶質のモル体積 v に対してプロットすると右下がりの直線が得られ、その勾配から膨潤圧が求められることが示された。なお、式 (1) は平衡状態で成立する関係であるので、復水過程に式 (1) を適用して推算した膨潤圧はあくまでも見掛けの値である。また、モル体積の異なる溶質としてオリゴマーの混合物を用いる場合には、麺の原料に加水分解酵素などが内在 (残存) する可能性があり、溶質の選択に注意が必要である。また、式 (1) は単純な分配平衡が成立するときの関係であるので、溶質が麺に吸着する場合には適用できない点にも留意が必要である。

<引用文献>

- 1) T. Ogawa, A. Hasegawa, A. Adachi: Effects of relaxation of gluten net work on rehydration kinetics of pasta. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **78**, 1930-1934 (2014).
- 2) U. Aimoto, T. Ogawa, A. Adachi: Water sorption kinetics of spaghetti prepared under different drying conditions. *Food Sci. Technol. Res.*, **19**, 17-22 (2013).
- 3) T. Ogawa, A. Chuma, U. Aimoto, S. Adachi: Characterization of pasta prepared under different drying conditions. *J. Food Sci.*, **80**, E1959-E19644 (2015).
- 4) T. Ogawa and S. Adachi: Drying and rehydration of pasta. *Drying Technol.*, **35**, 1919-1949 (2017).
- 5) S. Adachi, T. Watanabe, M. Kohashi: Role of swelling pressure on the distribution coefficient of maltooligosaccharide in a cation-exchange resin. *Agric. Biol. Chem.*, **53**, 3203-3208 (1989).
- 6) S. Adachi, Y. Miyagawa, H. D. Ariyanto, T. Kobayashi, H. Yoshii: Water sorption kinetics of starch noodles with different cross-sectional shapes. *Starch*, **73**, 2000235 (2021).
- 7) A. Hasegawa, T. Ogawa, S. Adachi: Estimation of the gelatinization temperature of noodles from water sorption curves under temperature-programed heating conditions. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **76**, 2156-2158 (2012).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shuji Adachi, Yayoi Miyagawa, Hermawan Dwi Ariyanto, Takashi Kobayashi, and Hidefumi Yoshii	4. 巻 73
2. 論文標題 Water sorption kinetics of starch noodles with different cross-sectional shapes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Starch	6. 最初と最後の頁 2000235(1-6)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/star.202000235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------