

冷蔵保存を伴う煮物の食塩の拡散過程の予測と最適調理条件の設定

佐藤 瑤子

お茶の水女子大学基幹研究院

概要 塩味は煮物のおいしさに大きく影響するため、適度な食塩濃度に仕上がる調理条件を設定することは重要である。煮物の調理中には煮汁から食材へ食塩が拡散することで煮汁中の食塩量は減少する。煮汁の濃度は水分の蒸発の影響も受ける。また、煮物は調理後すぐに喫食するだけでなく冷蔵する頻度も高く、この間にも煮汁の食塩濃度は変化する。煮物の調理条件設定のためにはこのように刻々と変化する煮汁中の食塩濃度変化を考慮した予測を行う必要があるものの、食材と同時に煮汁の食塩濃度変化を予測した報告は見られない。本研究では加熱、冷却及び冷蔵中の煮汁及び根菜類中の食塩濃度の変化を予測し、冷蔵を伴う煮物の調理条件を設定することとした。

加熱中の食塩濃度変化を測定するため、いちよう切りダイコン(高さ2 cm, 半径3 cm 円柱の1/4)300 gと1%食塩水300 gを水から加熱し、0~30 分間沸騰継続した。次に、冷蔵中の食塩濃度変化を測定するため、2 cm 角ジャガイモ420 g及び1.4%食塩水420 gを水から加熱し、8.1 分間(最適加熱時間)沸騰継続、急速冷却した後、冷蔵した。測定項目は試料及び食塩水の食塩濃度、水温及び蒸発量とした。さらに、試料の食塩濃度を三次元拡散方程式により予測し、試料へ拡散した食塩量を算出した。食塩水濃度は食塩水から試料へ拡散した食塩量の予測値と蒸発量の実測値を用いて予測した。最後に、2 cm 角のダイコン及びジャガイモが消火後適度な食塩濃度(0.7%)になるまでの調味時間を算出した。これらの解析は有限要素法ベースのシミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics を用いて行った。

加熱中及び冷蔵中の試料及び食塩水の食塩濃度の計算値は実測値と概ね一致し、食塩水と食材の食塩濃度変化の同時予測が可能であることを確認した。食塩水濃度の予測値は加熱初期に一度低下し、その後上昇した。加熱初期には食塩水から食材への食塩の拡散による食塩水中の食塩量の減少の影響が蒸発による影響よりも大きく、加熱後半には蒸発の影響が大きくなることを明らかとした。急速冷却中も蒸発の影響が大きく、食塩水濃度は上昇した。冷蔵中には蒸発の影響がないため、食塩水濃度は低下し続けた。2 cm 角のダイコン及びジャガイモの調味時間はそれぞれ 91.7, 160.4 分であり、本法を用いることで冷蔵を伴う煮物の調味条件の設定が可能となった。

1. 研究目的

塩味は煮物のおいしさに大きく影響するため、食材を適度な食塩濃度に仕上げるために必要な最適調理条件を予測することは重要である。煮物は調理後すぐに喫食するだけでなく、冷蔵保存することも多くクックチルシステムに適しているとされており、冷蔵中の食塩濃度変化も考慮した調理条件の設定が重要である。ここでクックチルシステムとは加熱、急速冷却、冷蔵、再加熱の工程を経る調理システムを指し、病院や高齢者福祉施設など大量調理を行う給食施設で導入されている。クックチルシステムで

煮物を調理する際の最適調理条件設定のためには加熱、冷却、冷蔵及び再加熱の各工程における食塩濃度の変化を予測する必要がある。著者はこれまでに、ダイコン、ジャガイモ及びニンジン中の NaCl の拡散係数を測定し、加熱中及び消火後の余熱利用中の NaCl 濃度変化を予測可能であることを報告している¹⁾。またこれらの野菜の適度な食塩濃度は0.6~0.7%であることを明らかとし、この適度な濃度になるまでの調味時間を食塩濃度変化のシミュレーションに基づき設定した²⁾。しかし、クックチルシステムで調理した煮物の食塩濃度の変化を予測し、適度な食塩

濃度になるまでの調味時間を設定するという報告は見られない。

さらに、煮物の調理中には水分の蒸発に伴い煮汁は濃縮される。また食材重量に対して煮汁の量が少ないため、煮汁から食材へ食塩が拡散することで煮汁中の食塩量は減少する。このように刻々と変化する煮汁中の食塩濃度変化を考慮した予測を行う必要があるものの、これまでの食塩濃度変化の予測に関する研究は食材のみに着目されており、食材と同時に煮汁の食塩濃度変化を予測するという観点からの検討は行われていない。

そこで、本研究では加熱、急速冷却及び冷蔵の工程に着目し、根菜類中の食塩濃度の変化をシミュレーションし、冷蔵を伴う煮物の最適調理条件を設定することを目的として検討を行った。

2. 研究方法

2.1 加熱中の試料及び食塩水の食塩濃度変化の把握

2.1.1 試料

ダイコンを試料とした。実験当日に小売店で購入し、厚さ2 cm、半径3 cmの円柱を1/4にしたいちょう切りに成型した。

2.1.2 加熱

ダイコン300 gと1%食塩水300 gを片手鍋に入れ、蓋をしてガスコンロで加熱した。沸騰までは炎の大きさが鍋底の円周と同程度になるように火力を調節して加熱し、沸騰後弱火にして0~60分間沸騰継続した。

2.2 冷蔵中の試料及び食塩水の食塩濃度変化の把握

2.2.1 試料

ジャガイモを試料とした。小売店でまとめて購入し、4°Cの低温室で保存したものを2 cm角に成型した。

2.2.2 加熱

ジャガイモ420 gと1.4%食塩水420 gを片手鍋に入れ、蓋をしてIHヒーター(TOSHIBA, MR-F20)で加熱した。ここでの食塩水濃度は、ジャガイモと食塩水の合計重量に対して0.7%になる濃度として設定した。水温が99.5°Cになるまでは最大火力で加熱し、99.5°Cに達した後は最小火力で8.1分間加熱した。加熱時間は後述する試料内部温度変化の予測に基づき、硬さの予測式³⁾を用いて硬さの変化をプログラム計算によりシミュレーションし、中心部が適度な硬さ⁴⁾になるまでの時間を予測した。

2.2.3 急速冷却

冷却にはブラストチラー(IRINOX, AL-5M)を用いた。加熱後、ブラストチラー庫内に鍋を入れ、鍋の蓋を外して80分間冷却した。

2.2.4 冷蔵

冷却終了後、試料をタッパーに入れ、冷蔵庫(FUKUSHIMA, RXW-50RM7)で0~24時間保存した。

2.3 温度測定

K型熱電対(安立計器)及びデータコレクタ(安立計器, AM-8000K)を用いて水温及び試料の中心温度を測定した。

2.4 蒸発量の測定

加熱前後及び冷却後の鍋全体の重量を、電子天秤を用いて測定し、重量減少分を蒸発量とした。

2.5 食塩濃度の測定

ダイコン及び生のジャガイモはホモジナイズ(エムエステー, HF93)した後、吸引濾過して定容したものを試料液とした。加熱後のジャガイモはホモジナイズ後に遠心分離(SAKUMA, 50A-IVD)し、上清を定容して試料液とした。得られた試料液の食塩濃度をモール法によって測定した。

2.6 解析方法

試料内部の食塩濃度の予測に用いる拡散係数は温度により変化する値である。そのため、座標 x,y,z で表される $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ の試料について、まず試料内部温度を予測し、予測値に対応した拡散係数を求め、試料及び食塩水の食塩濃度を予測した。計算には、有限要素法ベースのシミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics® 5.3 (COMSOL Inc.)を用いた。

2.6.1 試料内部温度の予測

$T(x,y,z,t)$ は時間 t における点 $P=(x,y,z) \in \Omega$ で定義される温度(K)であり、以下に示す三次元熱伝導方程式を用いて記述することができる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla T) \quad (1)$$

ここで、 $\nabla^2 (= \nabla \cdot \nabla)$ はラプラス演算子、 α は熱拡散率(cm^2/s^2)、 t は時間(sec)である。熱拡散率は、先行研究の値⁵⁾を用いた。初期条件は、式(2)で表される。

$$T(x,y,z,0) = T_0 \quad x,y,z \in \Omega \quad (2)$$

ここで、 T_0 は、試料の初期温度である。境界条件は、次の式(3)で表される。

$$T(x, y, z, t) = T_{water} \quad x, y, z \in \partial\Omega, t \geq 0 \quad (3)$$

ここで、 $\partial\Omega$ は試料の表面であり、 T_{water} は水温である。

2. 6. 2 試料内部の食塩濃度の予測

$C(x, y, z, t)$ は時間 t における点 $P=(x, y, z) \in \Omega$ で定義される食塩濃度 (%) であり、以下に示す三次元拡散方程式を用いて記述することができる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) \quad (4)$$

ここで、 D は拡散係数 (cm^2/s) であり、前報の値を用いた。初期条件は、式(5)で表される。

$$C(x, y, z, 0) = C_0 \quad (x, y, z) \in \Omega \quad (5)$$

ここで、 C_0 は試料の初期濃度である。境界条件は次の式(6)で表される。

$$C(x, y, z, t) = C_{water}(x, y, z, t) \quad x, y, z \in \partial\Omega, t \geq 0 \quad (6)$$

ここで、 C_{water} は食塩水濃度である。さらに、領域全体の平均食塩濃度 \bar{C} を求めた。

2. 6. 3 食塩水濃度の予測

調理中に食塩水濃度が変化する要因として、調理中に起きる蒸発及び食塩水から試料への食塩の拡散に着目し、任意の時間 $i+1$ における食塩水濃度 C_{water}^{i+1} を以下の式で表した。

$$C_{water}^{i+1} = \left(W_{salt}^i - W_{food}^i \times \bar{C}^i \right) / \left(W_{water}^0 - W_{evaporation}^i \right) \quad (7)$$

ここで、 W_{salt} は試料中及び食塩水中の食塩の合計重量、 W_{food} は試料重量、 W_{water} は食塩水重量、 $W_{evaporation}$ は蒸発量である。式(7)より任意の時間 $i+1$ における食塩水濃度を求め、試料内部の食塩濃度計算における境界条件に反映させた。

2. 6. 4 クックチルシステムを想定した調理条件の予測

クックチルシステムを想定し、2 cm 角のダイコン及びジャガイモが適度な硬さになるまでの加熱時間、冷却時間及び適度な食塩濃度になるまでの調味時間をプログラム

計算により求めた。

加熱時間はそれぞれの野菜の中心部が適度な硬さになるまでの時間とした。計算は前述の冷蔵中の食塩濃度変化の把握の際に行った加熱時間の設定と同様の方法で行った。クックチルシステムにおける冷却は、加熱終了後90分以内に中心温度を3°Cまで下げることとされているため、冷却時間は試料中心温度が3°Cになるまでの時間とした。調味時間は全体平均食塩濃度変化のシミュレーションに基づき、それぞれの野菜が消火後、適度な食塩濃度である0.7%になるまでの時間を計算した。

3. 研究結果

3. 1 加熱中の試料及び食塩水濃度変化の予測

初めに、加熱中の試料及び食塩水濃度変化の予測が可能かどうかを検討するため、いちょう切りのダイコン 300 g と1%食塩水 300 g を加熱し、水温、蒸発量、試料及び食塩水の食塩濃度を測定した。さらに、得られた水温変化及び蒸発量を用いて食塩水濃度及びダイコンの全体平均食塩濃度の変化を予測した。Fig. 1 に、ダイコン及び食塩水の食塩濃度の実測値及び予測値を示した。食塩水濃度及びダイコンの全体平均食塩濃度の予測値は実測値と概ね一致した。特に、食塩水濃度については加熱前半に一度低下し、その後上昇する変化を予測できることが確認された。

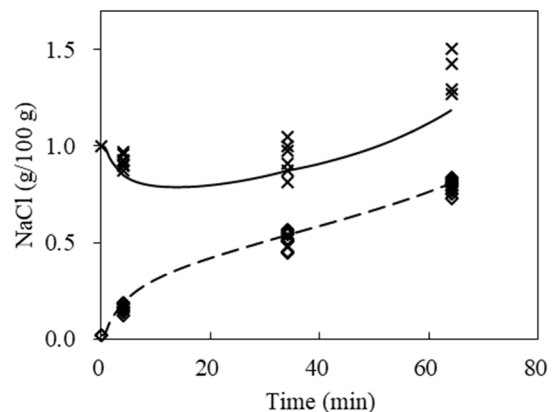


Fig. 1. Comparison of the predicted and the experimental values for NaCl concentration of solution and Japanese radish
 ×, Experimental value of the NaCl concentration of solution.
 ◇, Experimental value of the NaCl concentration of Japanese radish.
 —, Predicted value of the NaCl concentration of solution.
 ---, Predicted value of the NaCl concentration of Japanese radish.

3. 2 冷蔵中の試料及び食塩水濃度変化の予測

加熱中の食塩水及び試料の食塩濃度変化の予測が可能であることを確認したことから、次に冷却及び冷蔵中の食塩濃度変化について検討を行った。Fig. 2は2 cm角ジャガイモの中心温度の実測値及び水温変化から予測した試料中心温度の予測値である。試料中心温度の予測値と実測値は概ね一致した。そこで、得られた水温変化及び蒸発量の測定結果を用い、食塩水及びジャガイモの食塩濃度変化を予測した(Fig. 3)。冷蔵中についても、食塩水濃度及びジャガイモの全体平均食塩濃度の予測値は実測値と概ね一致した。また、冷蔵1日で食塩水とジャガイモの濃度差は約0.05%と、食塩水とジャガイモの濃度差はほとんどなくなった。

3. 3 冷却時間及び適度な食塩濃度になるまでの時間の予測

最後に、Fig. 2の実験で得られた水温変化を用いて算出したダイコン及びジャガイモ2 cm角の沸騰継続時間、冷却時間及び適度な食塩濃度(0.7%)になるまでの調味時間を予測した。結果をTable 1に示す。沸騰継続時間はダイコンの方が長かった。冷却時間は加熱停止後に試料中心温度が3°Cになるまでの時間を示しており、ジャガイモとダイコンは、熱拡散率は同じとみなしているため、冷却時間は同じ時間である。消火後適度な食塩濃度になるまでの調味時間はジャガイモが160.4分とダイコンの91.7分よりも長かった。

4. 考察

本研究では、試料の食塩濃度と同時に食塩水濃度の変化を予測するため、食塩水濃度が変化する要因として蒸発に伴う濃縮および食塩水から試料への食塩の拡散による食塩水中の食塩量の減少に着目して解析した。その結果、加熱、冷却及び冷蔵中の食塩水濃度及び根菜類中の全体平均食塩濃度変化の予測値と実測値は概ね一致し、食塩水濃度と食材中の食塩濃度変化の同時予測が可能であることを確認した。加熱中の食塩水の濃度変化は加熱初期に低下し、加熱後半に上昇した(Fig. 1)。加熱前半には食塩水から食材へ食塩が拡散することで食塩水中の食塩量が減少するという拡散の影響が蒸発の影響よりも大きいことで、食塩水濃度が低下したと考えられる。加熱後半には拡散の影響よりも蒸発の濃縮の影響が大き

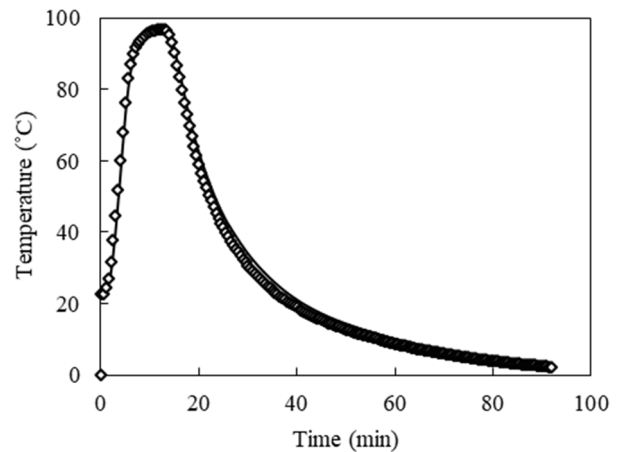


Fig. 2. Comparison of the calculated and experimental values for center temperature in 2-cm cubed potato
◇, experimental value of the center temperature of potato;
—, Calculated value of the center temperature of potato

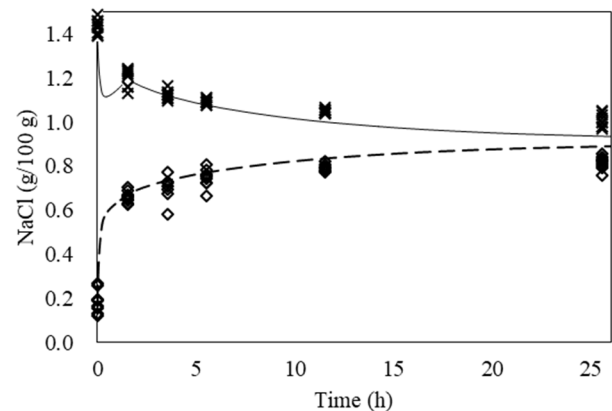


Fig. 3. Comparison of the predicted and the experimental values for NaCl concentration of solution and Japanese radish

- ×, Experimental value of the NaCl concentration of solution.
- ◇, Experimental value of the NaCl concentration of Japanese radish.
- , Predicted value of the NaCl concentration of solution.
- , Predicted value of the NaCl concentration of Japanese radish.

Table 1. Boiling, cooling and seasoning time of 2 cm cube of Japanese radish and potato

	(min)	
	Japanese radish	Potato
Boiling time	23.5	8.1
Cooling time	78.3	78.3
Seasoning time	91.7	160.4

くなったことで食塩水濃度は上昇した。また、冷却は鍋に蓋をせずに行ったため冷却中にも蒸発が起こっていた。そのため、冷却後の食塩水濃度は冷却前より高く、急速冷却時には蒸発の影響が大きかった。冷蔵はタッパーに蓋をして行ったことから水分の蒸発の影響はなく、冷蔵中の食塩水濃度は拡散の影響により低下し続けた。

さらに、このような解析を用いることで、加熱時間、冷却時間及び適度な食塩濃度になるまでの調味時間を設定可能になった。2 cm 角の場合には、ダイコン及びジャガイモのいずれも冷却時間は 78.3 分と、90 分以内に中心温度を 3°C まで下げるというクックチルシステムの管理基準の範囲内での冷却が可能であった。また、調味時間はダイコンで 1.5 時間、ジャガイモで 2.7 時間であった。調味時間はダイコンの方が短かったのは、拡散係数がジャガイモよりもダイコンの方が大きいためである。拡散係数の小さいジャガイモでも冷蔵 3 時間以内で適度な食塩濃度に達するということは、冷蔵後の煮物の品質管理の際に有用な知見であると考えられる。

以上より、食塩水から食材への食塩の拡散量及び蒸発を考慮した解析を行うことで、冷蔵を伴う煮物の食塩水及び食材の食塩濃度変化を詳細に把握することができた。さらに、本研究の手法を用いることで、冷蔵を伴う煮物の冷蔵前の冷却時間及び適度な食塩濃度になるまでの時間が設定可能となった。

5. 今後の課題

本研究ではクックチルシステムを想定した実験を行ったものの、実際にクックチルシステムが導入されている給食施設では食数規模の大きな大量調理が行われている。今後は大量調理を想定した冷却条件等の検討を行い、これも考慮した食塩の拡散過程の予測が必要である。

6. 文献

- 1) 遠藤瑤子; 藤居東奈; 香西みどり. 根菜類中の NaCl 拡散係数と調理過程の食塩濃度の予測. 日本調理科学会誌. 2013, **46**, 8-14
- 2) 遠藤瑤子; 渥美恵理; 香西みどり. 根菜類の食塩拡散過程の予測と適度な食塩濃度の評価. 日本調理科学会誌. 2012, **45**, 422-428
- 3) Kasai, M.; Hatae, K.; Shimada, A.; Iibuchi, S. A Kinetic Study of Hardening and Softening Processes in Vegetable during Cooking. *Nippon Syokuhin Kogyo Gakkaishi*. 1994, **41**, 933-941
- 4) 松裏容子; 香西みどり; 畑江敬子; 島田淳子. 野菜の最適加熱時間の予測. 日本食品工業学会誌. 1989, **36**, 97-102
- 5) 久保田清; 藤本真紀子; 鈴木寛一; 高崎かほる; 保坂秀明. 球状根菜類系食品の熱拡散率の算出に関する研究. 日本食品工業学会誌. 1981, **28**, 68-73

Prediction of Optimum Cooking Condition and Changes in NaCl of Nimono with Refrigerated Storage

Yoko Sato

Faculty of core research, Ochanomizu University

Summary

The concentration of NaCl in *Nimono* affects its palpability. The amount of NaCl in the seasoning liquid varies due to NaCl diffusion from the seasoning liquid into the solid food and water evaporation. *Nimono* is frequently refrigerated, which also affects the NaCl concentration. However, no studies have predicted the NaCl concentrations in solid food and seasoning liquid simultaneously. In this study, the changes in the NaCl concentrations in the seasoning liquid and solid food during heating, cooling, and refrigerating were simulated and the optimal conditions for preparing refrigerated *Nimono* were predicted.

Japanese radish (cylindrical with a height of 2 cm and radius of 3 cm) was quartered, heated from room temperature in 1% NaCl, and boiled for 0–30 min. Potatoes were cut into 2 cm cubes, heated from room temperature in 1.4% NaCl, and boiled for 8.1 min. They were then cooled rapidly and refrigerated. The NaCl concentration of the solid food was predicted using 3D diffusion equation and the amounts of NaCl diffused into the solid food from the solution was calculated. The concentration of solution was predicted using predicted value of the amounts of NaCl diffused into solid food and experimentally measured amount of water evaporation. The seasoning time to optimize the NaCl concentrations in the potato and radish, was predicted. The analysis was performed with COMSOL Multiphysics.

The predicted and experimental NaCl concentrations in the solution and solid food agreed closely. In the early stage, the NaCl concentration in the seasoning liquid decreased as it was more significantly affected by diffusion into the solid food than evaporation. However, evaporation became more significant later in the process, including during cooling, thus increasing the NaCl concentration in the solution. During refrigeration, the NaCl concentration in the solution decreased in the absence of evaporation. Thus, the seasoning time for 2-cm-cubed Japanese radish and potato were determined to be 91.7 and 160.4 min, respectively.