

根菜類中の NaCl 拡散係数と調理過程の食塩濃度の予測

Diffusion Coefficient of Sodium Chloride and Prediction of the Change in Sodium Chloride Concentration in Root Vegetables during Cooking Process

遠藤 瑤子*[§] 藤居 東奈* 香西みどり*

Yoko Endo

Haruna Fujii

Midori Kasai

The diffusion coefficient and change in NaCl concentration of root vegetables during cooking were studied. Japanese radish, carrot and potato cut in 2-cm cubes were soaked in a 0.2 M brine solution at 20, 50 and 70°C for 16, 8 and 6 hrs, respectively, for measuring the NaCl diffusion coefficient. The value for the diffusion coefficient of NaCl was in the order of Japanese radish, carrot and potato, suggesting that vegetables obtaining more water had higher diffusion coefficient. The diffusion coefficient of a 2-cm cube of radish soaked in 0.2-0.8 M brine solutions showed little dependence on the concentration of brine solution. The predicted and experimental values for the average NaCl concentration of each volume element agreed with each other when using the obtained diffusion coefficient under different temperature, brine concentration and time conditions. It was possible to predict the average or distribution in concentration of NaCl of a sample treated as a set of 1 mm³ of volume element by using the finite difference equation.

キーワード：食塩濃度 sodium chloride concentration；拡散係数 diffusion coefficient；シミュレーション simulation；根菜類 root vegetable；調理過程 cooking process

緒 言

食品の調味は調理の主要な操作の一つであり、特に塩味の付与はおいしさに関わる重要な要因であるため、調理過程における食品中の食塩濃度を予測することは最適な調理条件の設定という観点から、調理加工における大きな課題となっている。

食品中の物質移動は拡散現象によって起こる。調味液中での加熱において食品中に食塩がどのように拡散していくのかを予測するためには、水溶液（25°C）中の NaCl の拡散係数¹⁾よりも食品中の拡散係数の方が实际的である。一般に水溶液中の NaCl の自己拡散係数の測定には、導電率法、光吸収法、測光法、光反射法、光干渉法、比色法など多くの方法が知られている²⁾。しかし、これらの方法を食品に応用することは難しい。また、同じ方法で測定できないため、水溶液中の NaCl の拡散係数と、食品における食塩の拡散係数とを単純に比較することができない。

食品中の食塩の拡散係数に関しては、豚肉^{3,4)}、鶏肉⁵⁾、魚肉^{6,7)}、チーズ^{8,9)}といった動物性食品を対象とした報告が多くみられる。それに対して植物性食品についてはグリーンオリーブ¹⁰⁾、ピクルス¹¹⁾、ジャガイモ^{12,13)} およびダイコン^{12,14)} などに関して検討されているものの、報告はわずかである。グリーンオリーブ中の NaCl の拡散係数については、NaCl 水溶液が 7.3~12.6% の間で溶液濃度が高い

ほど大きくなること、前処理としてアルカリ溶液中に浸漬することで大きくなることが報告されている¹⁰⁾。Fick の拡散方程式により求めた円柱型ジャガイモ中の拡散係数は NaCl 水溶液が 1~5% の間で溶液濃度が高いほど大きく、NaCl 水溶液浸漬前に予備加熱を行うことで拡散係数が大きくなることが報告されている¹³⁾。また、ダイコンを試料とした二元収着拡散理論を適用した方法について報告されている¹⁴⁾。このように、拡散係数に関してはこれまでも報告がみられるものの、これらの報告の多くは一次元の拡散の系により求めたものであり、三次元の系により拡散係数を求めた報告は僅少である。煮物のような根菜類の調理を想定した場合、野菜は乱切りや角切りなどに成型されるため、食品内部への食塩の拡散は三次元的に起こることがほとんどであり、実際の調理を想定した場合、三次元の系による拡散過程の予測が必要となる。三次元の系により求めた拡散係数を用いて、実際の調理を想定した調理条件での試料内部の食塩濃度の予測に関しては、立方体に成型した寒天ゲル¹⁵⁾、ダイコン¹²⁾ およびジャガイモ¹²⁾ について、三次元拡散方程式の解を用いる方法が報告されている。しかし、三次元拡散方程式は加熱中の温度および溶液濃度が一定である場合を想定しているため、温度変化や濃度変化を伴う場合の予測には対応できない。

そこで、本研究では、温度や濃度の変化を伴う実際の調理を想定した条件での野菜における食塩の拡散係数を実験により求め、得られた拡散係数を用いて拡散方程式に対する差分方程式に基づいたプログラムを用いた数値計算により、温度や濃度の変化を伴う調理条件での野菜の食塩濃度の分布および全体濃度の予測を行い、実際の調理における

* お茶の水女子大学大学院

(Graduate School, Ochanomizu University)

[§] 連絡先 お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科

〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

TEL 03(5978)5765 FAX 03(5978)5760

食塩の拡散過程のシミュレーションの可能性を検討した。

実験方法

1. 試料

試料として青首ダイコン、五寸ニンジン、男爵イモを用いた。NaCl 水溶液は、試薬 NaCl (和光, 特級) と脱イオン蒸留水を用いて 0.2~0.8 M (1.17~4.68%) に調製した。

2. 試料調製方法

試料中の食塩の拡散係数を求めるために、ダイコンは両端を 10 cm ずつ切断し皮をむき、ニンジンは両端を 3 cm ずつ切断し皮をむき、男爵イモは皮をむき、成型器を用いて 2 cm 角の立方体に成型した。また、ふろふき大根の厚切りの輪切りを想定し、直径 6 cm、高さ 2 cm の円柱型にステンレス製の型抜きで成型した。

2 cm 角試料を一定温度で加熱する際には、試料の細胞膜機能を低下させるため、中心部が 60℃ 以上になるよう、99.5℃ の脱イオン蒸留水で各々 12 分間加熱し (細胞膜処理)、その後、試料が均一に所定の温度 (20, 50, 70±1℃) になるまで、各温度の脱イオン蒸留水に各々 12, 5, 3 分間浸漬した。試料中心部が所定の温度になるまでの加熱、浸漬時間は以下に示した三次元熱伝導微分方程式に対する差分方程式に基づいたプログラムを用いた数値計算により、所定の温度で加熱、浸漬した際の試料中心温度変化を予測して決定した。試料に K 熱電対を挿入し、中心部が所定の温度に達していることを確認した。

以下に示すように、実際の調理を想定して 2 cm 角を水から加熱し、沸騰継続後、余熱を利用するという水温変化を伴う浸漬および円柱型試料については、生試料を用いた。

3. 浸漬方法

濃度変化の影響を少なくするために、試料重量の 20 倍以上の 0.2~0.8 M NaCl 水溶液を、ビーカーに入れ、アルミ箔で蓋をして、所定の温度の恒温水槽 (アズワン, THERMAR ROBO, TR-1A) に入れ、所定の温度 (20, 50, 70±1℃) に保持した。恒温水槽をマグネチックスターラー (アズワン, PASOLINA MAGNETIC STIRRER, CT-5) の上に置き、ビーカー内をスターラーにて約 30 rpm で攪拌した。2 cm 角に成型した試料を所定の温度のビーカーに入れて NaCl 水溶液に浸漬した。試料は 5 分~16 時間の間で経時的にとりだした。NaCl 水溶液の濃度は浸漬前後でデジタル塩分計 (ATAGO, ES-421) により確認した。

水温変化を伴う調理として、半寸胴鍋 (池商, パワーデンジシリーズ, 容量 5 L) に室温 (20℃) の 0.34 M (2.00%) NaCl 水溶液 3 L および試料を入れ、水から加熱し沸騰継続を 5 分間行い、消火した。消火後は 20℃ の恒温室に放置した。水温は、加熱開始後 7 分で沸点に達し、加熱開始 3 時間後に 30℃ となった。

ふろふきダイコンを想定した円柱型生試料は、99.5℃ に

保持した 0.2 M の NaCl 水溶液 4 L に浸漬し、浸漬開始から 1 時間後にとりだした。

4. 食塩濃度の測定方法

三次元試料中の食塩の拡散係数を求めるために、各試料を精秤し、脱イオン蒸留水を 30 ml 加え、2 分間 10,000 rpm でホモジナイズし (エスエムテール, HIGH-FLEX HOMOGENIZER HF93), ろ紙 (ADVANTEC, No. 2, φ110 mm) を用いて、ブフナー漏斗で吸引ろ過し、ろ液洗浄を 3 回行い、100 ml にメスアップして試料液とした。ジャガイモはメスアップ後、遠心分離 (SAKUMA, 50A-IVD, 12,000 rpm, 15 分) し、上清を試料液とした。試料液の食塩濃度の測定は、モール法¹⁶⁾ による硝酸銀水溶液の沈殿滴定により行った。ニンジン試料液のみ、試料液を 0.8 μm のメンブレンフィルター (PALL, 25 mm Acrodisc, Syringe Filters 0.8 μm) に通してから滴定を行った。

0.34 M NaCl 水溶液に浸漬した 2 cm 角試料は、外側の厚さ 5 mm の部分と内側 1 cm 角にわけた各々について、円柱型試料は全体について、同様に食塩濃度を測定した。試料を浸漬してから 10 分間隔で浸漬液の食塩濃度を塩濃度計 (アタゴ, SALT METER ES-421) により測定した。

5. 水分含量の測定方法

水分含量は食品成分表分析マニュアル¹⁷⁾ に従い、ダイコン、ニンジンは減圧加熱乾燥法、ジャガイモは常圧乾燥法により測定した。

6. 計算方法

Visual Basic (Microsoft) を用いてプログラムを作成し、計算を行った。

1) 食塩濃度

三次元試料中の食塩の拡散係数は、三次元拡散方程式 (1) に対する差分方程式を用いて、試料全体の平均食塩濃度の予測値と実測値との差が最小 (最小二乗法) になるように、プログラムを用いた数値計算によって求めた。本来、拡散係数の算出は、一定温度について行うため、式 (1) に示す三次元拡散方程式の解により求められる¹⁵⁾。しかし、本研究では試料の周囲の水温および食塩濃度が時間と共に変化する非定常状態を対象とするため、式 (1) の解析解を求めることができない。そこで、式 (1) に対する差分方程式による予測値と三次元拡散方程式の解による予測値が等しいと仮定して、拡散係数を算出する際も、差分方程式 (2) を用いた。式 (2) は時刻 k における任意の位置の食塩濃度の時間変化を表す式である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 C は濃度 (g/kg), t は加熱時間 (sec), X, Y, Z は中心からの距離 (cm), D は拡散係数 (cm²/s) である。

$$C_{m,n,p}^{k+1} = D\Delta t \left(\frac{C_{m+1,n,p}^k + C_{m-1,n,p}^k}{(\Delta x)^2} + \frac{C_{m,n+1,p}^k + C_{m,n-1,p}^k}{(\Delta y)^2} + \frac{C_{m,n,p+1}^k + C_{m,n,p-1}^k}{(\Delta z)^2} \right) + \left[1 - \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2} \right) 2D\Delta t \right] C_{m,n,p}^k \quad (2)$$

ここで、 m, n, p は微小要素における x, y, z 座標とする。

また、初期条件と境界条件はそれぞれ $t=0$ のとき $C=C_0$, $t>0$ のとき、 $C=C_s$ である。 C_0 は試料の初期濃度 (g/kg), C_s は NaCl 水溶液濃度 (g/kg) である。

ここで、解が安定するための制約条件は、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ とすると、

$$(\Delta x)^2 / (D\Delta t) \geq 6 \quad (3)$$

であり、これを満たす空間増分として $\Delta x = 1$ mm, 時間増分として $\Delta t = 1$ 秒とした。計算にあたり、試料成分および組織構造は一定とみなすという近似的取り扱いを行った。上記式 (2) を用い、 $\Delta x, y, z$ を 1 mm とした時の各座標における予測 (Fig. 1a) と、立方体試料を 1 mm³ の体積要素の集合体とし、差分方程式を用いて各体積要素の食塩濃度の平均値を試料の食塩濃度とする予測 (Fig. 1b) の 2 種類の計算方法を用いた。まず、熱伝導解析により各点および体積要素の温度を算出し、その温度における拡散係数を用いて、三次元拡散方程式に対する差分方程式に基づくプログラムを用いた数値計算により、各点および体積要素の食塩濃度を予測した。点における予測では、2 cm 角試料を内側 1 cm 角と外側厚さ 5 mm に分け、中心部を通る各点の平均値を点による予測値とし、体積要素による予測では、内側 1 cm 角と外側厚さ 5 mm に分けた時のそれぞれ全ての体積要素の平均値を体積要素による予測値とした。円柱型試料では、実測した浸漬液の食塩濃度を表面食塩濃度として体積要素による予測を行った。

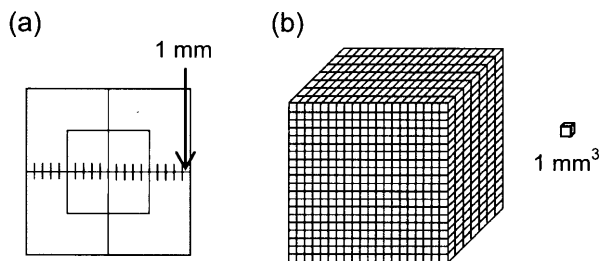


Fig. 1. Image for calculation

(a) Image of point, (b) Image of volume element

2) 試料内部温度

拡散係数は温度により変化する値であり、食塩濃度の変化を予測するうえで、試料内部温度を知ることが重要とな

る。直方体試料の内部温度の予測は、以下に示す三次元熱伝導微分方程式 (4) を用いて予測を行う事ができる。しかし、本研究では水温、すなわち境界条件が時間と共に変化する非定常状態を対象とするため、式 (4) の解析解を求めることができない。そこで、式 (2) と同様に式 (4) を差分方程式 (5) で表わし、時刻を k として、試料内部温度の予測を行った¹⁸⁾。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (4)$$

ここで、 T は温度 (K), α は熱拡散率 (cm²/s) である。

$$T_{m,n,p}^{k+1} = \alpha \Delta t \left(\frac{T_{m+1,n,p}^k + T_{m-1,n,p}^k}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1,p}^k + T_{m,n-1,p}^k}{(\Delta y)^2} + \frac{T_{m,n,p+1}^k + T_{m,n,p-1}^k}{(\Delta z)^2} \right) + \left[1 - \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2} \right) 2\alpha \Delta t \right] T_{m,n,p}^k \quad (5)$$

ここで、初期条件と境界条件はそれぞれ $t=0$ のとき、 $T(m, n, p) = T_0$ である。本解析では試料表面の温度が水温と同じと仮定し、水温の時間的変化を境界条件として試料表面に与えた。すなわち、 $t>0$ のとき、 $T(m, n, 0) = T(m, 0, p) = T(0, n, p) = T_w$ である。 T_0 は初期温度、 T_w は時刻 k における水温を表わす。解が安定するための制約条件は、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ とすると、

$$(\Delta x)^2 / (\alpha \Delta t) \geq 6 \quad (6)$$

である。ここで、熱拡散率は密度、熱伝導率、比熱より得られる値であり、本来温度の影響を受ける。しかし、先の研究において、久保田らの値を用いて、水温変化を伴う場合のジャガイモの 20~99.5℃での加熱における試料内部温度の予測が可能であることを報告しており¹⁸⁾、本研究でも熱拡散率は温度によらず一定とみなし、熱拡散率は文献値 1.5×10^{-3} cm²/s¹⁹⁾ を用いた。

なお、円柱型試料の食塩濃度および内部温度の予測については、式 (2) および (5) より、円柱に外接する直方体の計算モデルに対して、表面から外側に相当する部分に水温および食塩濃度と同じ値を境界条件として与えた。

結果および考察

1. 各種根菜類中の拡散係数の測定

20~70℃の各温度の 0.2 M の NaCl 水溶液に浸漬したダイコン、ジャガイモ、ニンジン 2 cm 角試料の食塩濃度および試料重量の経時変化を測定した。試料重量はダイコン、ニンジンで減少傾向に、ジャガイモは増加傾向にあったが、実際の調理では調理後の食品に含まれる食塩量が重要となるため、加熱後の試料 1 kg あたりの変化として表わした。試料によって加熱後の重量変化の傾向が若干異な

根菜類中の NaCl 拡散係数と調理過程の食塩濃度の予測

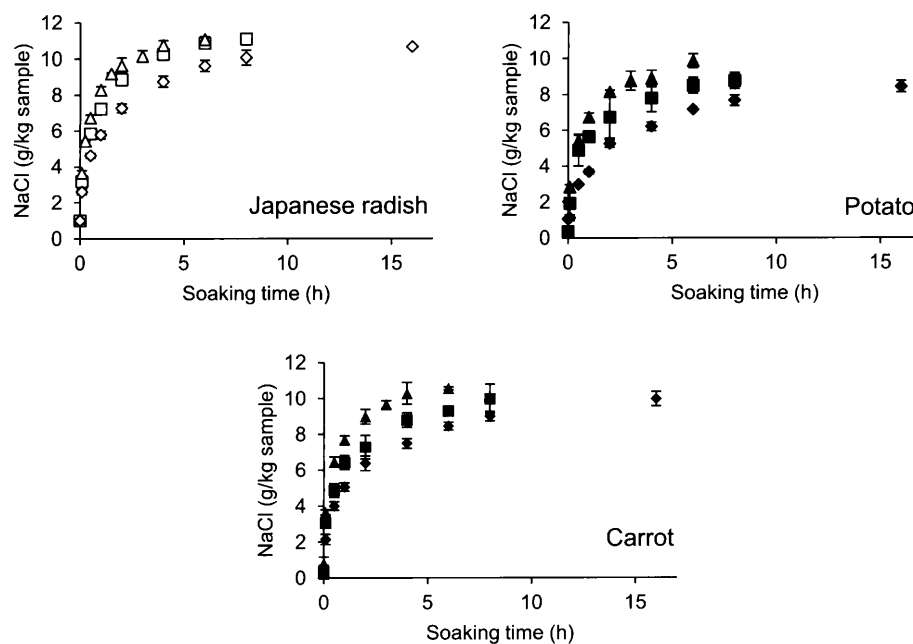


Fig. 2. Changes in NaCl concentration of 2 cm cube Japanese radish, potato and carrot soaked in 0.2 M brine solution

◇, Japanese radish (20°C); □, Japanese radish (50°C); △, Japanese radish (70°C); ◆, potato (20°C); ■, potato (50°C); ▲, potato (70°C); ◆, carrot (20°C); ■, carrot (50°C); ▲, carrot (70°C)

る。そこで、各試料の加熱前後の重量変化から生試料に換算するときの値を求めた。その結果、生試料に対する変化として示す場合には、加熱後の値にダイコン、ジャガイモ、ニンジンそれぞれ 0.98, 1.1, 0.95 で除すれば生試料に対する変化に換算できるとした。

20, 50, 70°C の 0.2 M の NaCl 水溶液に試料を浸漬した時の食塩濃度の変化を Fig. 2 に示す。いずれの試料も低温であるほど食塩濃度の増加は緩やかであり、20°C で 16 時間、50°C で 8 時間、70°C で 6 時間の時点で食塩濃度の変化はわずかとなった。また、いずれの温度においてもダイコンが最も食塩濃度の変化が速く、ジャガイモが最も緩やかであった。Fig. 2 の結果を用いてプログラムを用いた数値計算により各温度における拡散係数を求め、得られた拡散係数 D (cm^2/s) について、絶対温度の逆数に対してプロットしたところ (Fig. 3), 高い相関で直線に回帰され ($r = 0.9999 \sim 0.9699$), 拡散係数の温度依存性を次のアレニウスの式 (7) で表わした。

$$D = A \exp(-E/RT) \quad (7)$$

ここで、 A は頻度因子 (cm^2/s), T は絶対温度 (K), R は気体定数 8.314 ($\text{J}/\text{mol} \cdot \text{K}$), E は活性化エネルギー (J/mol) である。また、生試料の食塩濃度はいずれの野菜も実測値より、1.0 g/kg 試料として計算を行った。

Fig. 3 のアレニウスプロットの傾きから、見かけの活性化エネルギーを求め、さらに頻度因子を算出し、Table 1 に示した。小竹は前処理したダイコンおよびジャガイモを

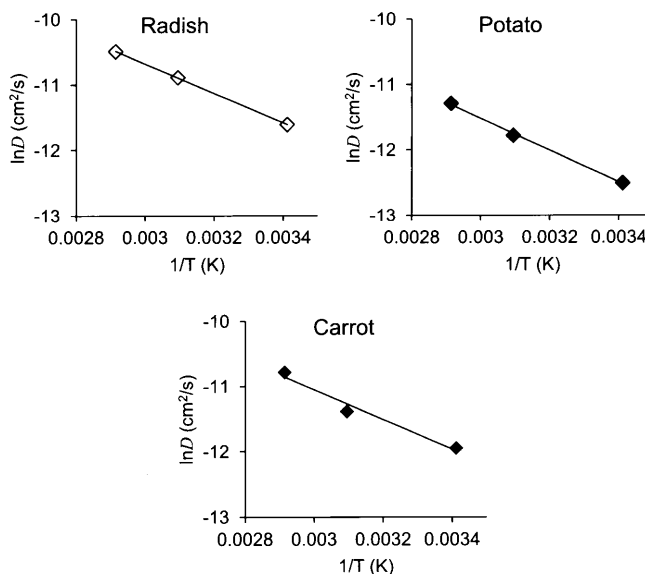
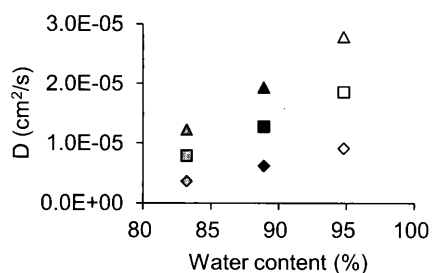


Fig. 3. Arrhenius plots of diffusion coefficient (D) of NaCl in Japanese radish, potato and carrot soaked in 0.2 M brine solution

100°C の 0.1 M NaCl 水溶液中で加熱した時の拡散係数をそれぞれ 4.0×10^{-5} , $3.3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ と報告しており¹²⁾, 本研究はそれらの値とほぼ一致した。さらに、Liu はジャガイモ中の NaCl 拡散係数の活性化エネルギーを 20~24 kJ/mol と報告しており¹³⁾, 本研究のジャガイモの値はこれとほぼ一致している。また、ダイコン、ニンジンについても Liu とほぼ同程度の値が得られた。一般に、食品中の調味成分の拡散現象は食品内部の空隙に満たされた水溶液中を

Table 1. Apparent activation energy (E) and frequency factor (A) of the diffusion coefficient (D) of NaCl in Japanese radish, potato and carrot

	A (cm ² /s)	E (J/mol)	D ($\times 10^{-5}$ cm ² /s)		
			90°C	95°C	99.5°C
Radish	0.0196	18,706	4.00	4.35	4.68
Potato	0.0147	20,224	1.81	1.98	2.15
Carrot	0.0151	19,003	2.79	3.04	3.28

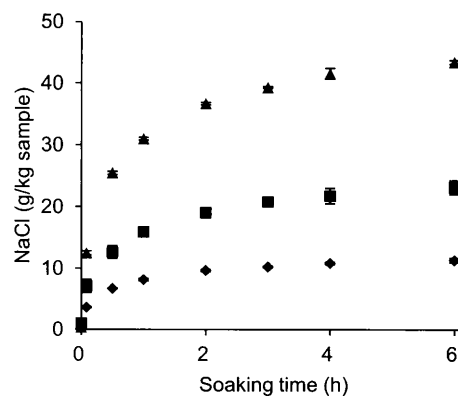
**Fig. 4.** Relationship between diffusion coefficient (D) and water content of sample at various temperatures

◇, Japanese radish (20°C); □, Japanese radish (50°C); △, Japanese radish (70°C); ◆, potato (20°C); ■, potato (50°C); ▲, potato (70°C); ◆, carrot (20°C); ■, carrot (50°C); ▲, carrot (70°C)

調味成分が移動するため、食品中の水分含量が多いほど食塩の浸透は速くなる。これまでに、食品中の水分含量と食塩の浸透量は対応していることや²⁰⁾、水分含量約80%のジャガイモよりも約95%のダイコンの方が拡散係数が大きいこと¹²⁾が報告されている。そこで、Table 1に示した頻度因子(A)と見かけの活性化エネルギー(E)を用い、式(3)より20, 50および70°Cにおける拡散係数を求め、生試料の水分含量との関係を比較した(Fig. 4)。拡散係数はいずれの温度においても水分含量が多いほど大きく、これまでの報告と一致した。煮物調理では野菜は調味液に満たされており、水分含量の変化が小さいため、生の時点での水分含量が拡散係数に大きく影響すると言える。

2. 拡散係数の濃度依存性

一般的に拡散係数は溶液濃度に依存する¹⁰⁾が、実際の野菜を試料とした値との比較は少ない^{12,13)}。そこで、ダイコン2 cm角試料を70°Cの0.2 M (NaCl 1.17%に相当)、0.4 M (NaCl 2.34%に相当)、0.8 M (NaCl 4.68%に相当) NaCl水溶液に浸漬した際の試料中の食塩濃度の経時変化を測定した。測定の結果をFig. 5に示す。NaCl水溶液濃度が高いほど試料中の食塩濃度の増加も速くなった。この結果を用いてプログラムを用いた数値計算により0.2~0.8 M NaCl水溶液に浸漬した際のダイコン中の70°Cにおける食塩の拡散係数を求めたところ、Table 2に示したようにいずれもほぼ同程度であったものの、0.8 M NaCl水溶液中の拡散係数はやや低くなった。Liuはジャガイモ中のNaCl拡散係数がNaCl水溶液濃度が1~5%の間で溶液濃度が高いほど大きいことを報告しており¹³⁾、本研究ではLiuと同様の結果を得られなかった。その理由として、根菜類

**Fig. 5.** Changes in NaCl concentration of 2 cm cube Japanese radish in brine solution with various kinds of concentration at 70°C
◆, 0.2 M NaCl; ■, 0.4 M NaCl; ▲, 0.8 M NaCl**Table 2.** Concentration dependence of diffusion coefficient (D) of NaCl in Japanese radish at 70°C

NaCl concentration of solution	Diffusion coefficient at 70°C ($\times 10^{-5}$ cm ² /s)
0.2 M	2.78
0.4 M	2.70
0.8 M	2.39

の構造は複雑であり、溶液濃度と拡散係数の関係を捉えることが難しいためと考えられる。さらに、根菜類の煮物を想定した時、煮汁の食塩濃度は1~2%程度であり^{21,22)}、0.8 M (4.68%)は実際の調理を想定した場合には濃すぎる。そこで本研究では、実際の調理として現実的と考えられる0.2および0.4 M NaCl水溶液中で加熱したダイコン中の拡散係数は同程度であることから、調理で扱う1~2%の範囲では、ダイコン中の食塩の拡散係数の濃度依存性は考慮しなくてよいこととし、以下の予測では0.2 M NaCl水溶液に浸漬した際の拡散係数を代表値として用いることとした。

3. 実際の調理を想定した食塩濃度の予測

Table 1に示した頻度因子と見かけの活性化エネルギーにより求めた拡散係数を用いて、三次元拡散方程式に対する差分方程式(2)より試料全体の平均食塩濃度の予測を行い、実測値との比較を行った。

2 cm角試料を0.34 M (2.00%) NaCl水溶液中で室温から加熱し、余熱を利用して目標の硬さになるよう加熱した際の試料全体の平均食塩濃度の変化について外側厚さ5 mmの部分と内側1 cm角それぞれの濃度の実測値と予測値について、Fig. 6aに点による予測値と実測値、Fig. 6bに体積要素による予測値と実測値を示した。なお、余熱を利用した調理であり、沸騰継続時間は5分と短いため、加熱によるNaCl水溶液の濃度変化はみられなかった。Fig. 6aに示した点による予測値とFig. 6bに示した体積要素による予測値を比較すると、点による予測値は体積要素による予測値よりも1~3 g/kg小さく、点による予測値は各時間における実測値よりも外側、内側ともに小さく、ずれが大

根菜類中の NaCl 拡散係数と調理過程の食塩濃度の予測

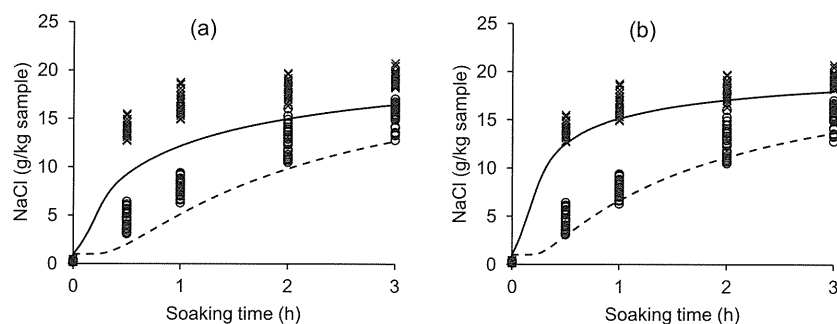


Fig. 6. A predicted value and experimental value of NaCl concentration in the outer part and the inner part of 2 cm cube of Japanese radish after soaking in 0.34 M brine solution
A predicted value (a) point, (b) volume element and experimental value ($n=30$).
×, outer part of experimental value; ○, inner part of experimental value; —, outer part of predicted value; ---, inner part of predicted value.

きかった。一方, Fig. 6b に示すように体積要素による予測は, 試料の外側, 内側とも予測値は実測値よりやや低めではあるが実測値の範囲内にあった。ここで実測値は試料のある部分を取り出した時の全体の濃度であり, 厳密には点による予測は, 実測値に対応した予測とはいえないため, 実測値と比較を行うためには, 試料が一定の形状を持っているという実際に合わせて体積要素を用いた予測を行う必要があると言える。また, 試料を外側と内側に分けた時のそれぞれの予測値が, いずれも実測値の範囲内にあったことから, 試料内部の食塩濃度の分布の予測が可能であるといえる。

次に, 実際の調理で用いられる形状としてふろふき大根の厚切りの輪切りを想定し, 直径 6 cm 高さ 2 cm の円柱型のダイコン試料を, 99.5℃の一定温度に保持した 0.2 M (1.17%) NaCl 水溶液に浸漬した。十分に軟化し, 食べて適度と感じる硬さとなる 1 時間浸漬後の試料内部の食塩濃度分布を予測し, さらに試料全体の平均食塩濃度の予測値と実測値の比較を行った。ここでは沸騰状態での加熱は水分の蒸発が多いことを考慮し, 食塩濃度を経時的に測定して, この実測値を試料の外周濃度として試料内部の濃度変化を予測した。測定の結果, NaCl 水溶液濃度は加熱前は 0.2 M であったが, 加熱 1 時間後の NaCl 水溶液濃度は 0.3 M (1.76%) であった。

ここで, 1 時間浸漬後の試料の中心部を通る断面図の食塩濃度の分布をシミュレーションにより予測した (Fig. 7)。浸漬 1 時間の時点で試料全体の平均食塩濃度が 11 g/kg であるのに対し, 試料表面部分は 15~16 g/kg, 中心部は 3 g/kg と, 試料内部に食塩濃度の分布がみられたが, 断面部分の体積要素のうち 55%は食塩濃度 3~5 g/kg の範囲内にあった。実際の調理を想定すると試料中の食塩濃度が均一になるまで加熱するというより全体として適度な食塩濃度のときを調理終了とすると考えられるが, このとき試料内部の詳細な分布を実験により求めることは非常に難しい。そのため, 計算により試料内部の食塩濃度の分布を予測することは視覚情報として有用であり, 調理加工において

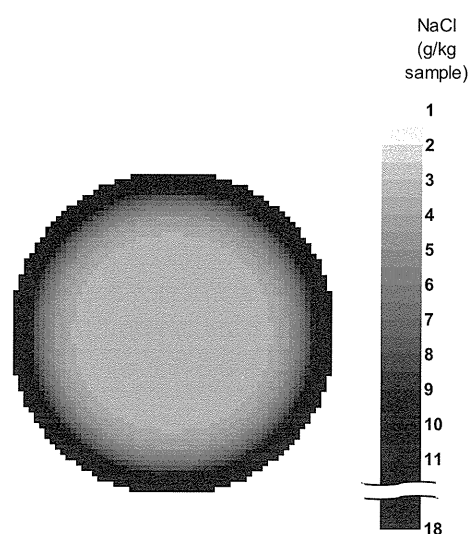


Fig. 7. Simulation of distribution of NaCl concentration in cylinder sample (a diameter of 6cm and 2cm in height) of Japanese radish after soaking in a 0.2 M brine solution at 99.5℃, 1 h

調味操作の最適化を行ううえで重要な手法であると言える。

さらに, この時の試料全体の平均食塩濃度の実測値と, シミュレーションによる予測値を, Fig. 8 に示した。1 時間浸漬後の試料全体の平均食塩濃度の予測値は, 実測値とほぼ一致した。よって, 実際の調理を想定した円柱型試料であり, なおかつ試料周囲の NaCl 水溶液濃度が変化する場合にも試料全体の平均食塩濃度の予測値と実測値が一致することが確認できた。試料内部の各体積要素の食塩濃度を実際に測定することは難しいが, 本結果より Fig. 7 に示した試料内部食塩濃度の分布の予測が妥当であると言える。

以上より, 本実験で求めた調理過程における各根菜類中の拡散係数を用いて三次元拡散方程式に対する差分方程式による計算を行うことで, 加熱温度や食塩濃度が変化するような実際の調理を想定した条件下での試料全体の平均食塩濃度および試料内部の食塩濃度分布の予測が可能であった。特に, 0.2 M NaCl 水溶液に浸漬した試料中の拡散係

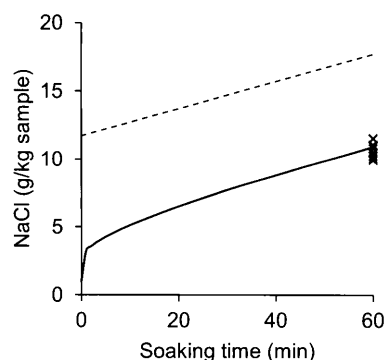


Fig. 8. Predicted value and experimental value of NaCl concentration in cylinder sample (a diameter of 6 cm and 2 cm in height) of Japanese radish after soaking in a 0.2 M NaCl solution at 99.5°C

—, Predicted value of NaCl concentration in the sample for the volume element; ×, Experimental value in the sample (n=10); ---, experimental value of NaCl concentration in the solution during cooking. (NaCl concentration changes during cooking. The experimental value was used as surface concentration for the prediction of NaCl concentration of the sample.)

数を代表値として用いることで実際の調理に用いられる食塩濃度1~2%の範囲では0.2 M NaCl水溶液中で測定した拡散係数を用いることで予測が可能であることが示された。ここで得られた結果は野菜の調理加工における調味の予測と制御に有用な知見であると考えられる。

文 献

- 1) 日本化学会編 (2004), 「化学便覧 基礎編Ⅱ」, 丸善, 東京, pp. II-58-62
- 2) 化学大辞典編集委員会編 (1960), 「化学大辞典 2」, 共立出版, 東京, p. 328
- 3) Hashiba, H., Gocho, H. and Komiyama, J. (2009), Dual mode diffusion and sorption of sodium chloride in pork meats under cooking conditions, *LWT-Food Sci. Technol.*, **42**, 1153-1163
- 4) Barat, J. M., Baigts, D., Aliño, M., Fernández, Francisco J. and Pérez-García, Victor M. (2011), Kinetics studies during NaCl and KCl pork meat brining, *J. Food Eng.*, **106**, 102-110
- 5) Volpato, G., Michielin, E. M. Z., Ferreira, S. R. S. and Petrus, J. C. C. (2007), Kinetics of the diffusion of sodium chloride in chicken breast (pectoralis major) during curing, *J. Food Eng.*, **79**, 779-785
- 6) 酒井信, 三木正之 (1982), 魚肉内における塩類の移動速度, *日食工誌*, **29**, 490-495
- 7) 上柳富美子, 安達真理子, 安達修二 (1992), ふり塩における吸塩量から算出した魚肉中の食塩の見掛けの拡散係数, *調理科学*, **25**, 283-287
- 8) Geurts, T. J., Walstra, P. and Mulder, H. (1974), Transport of salt and water during salting of cheese. 1. Analysis of the processes involved, *Neth. Milk Dairy J.*, **28**, 102-129
- 9) Patricia, E. G. and Amelia, C. R. (2003), A model for determination of multicomponent diffusion coefficients in foods, *J. Food Eng.*, **56**, 401-410
- 10) Drusas, A., Vagenas, G. K. and Saravacos, G. D. (1988), Diffusion of sodium chloride in green olives, *J. Food Eng.*, **7**, 211-222
- 11) Pflug, I. J., Fellers, P. J. and Gurevitz, D. (1967), Diffusion Rates in the Desalting of Pickles, *Food Technol.*, **21**, 1634-1638
- 12) 小竹佐知子 (1990), 食品の調味機構の解析—食品内部への調味料の拡散—, 博士論文, 105-137
- 13) Liu, H. (1992), A kinetic study of salt diffusion in potato at high temperature, *Int. J. Food Sci. Technol.*, **27**, 443-455
- 14) Hashiba, H., Komiyama, J., Nakanishi, T. and Gocho, H. (2007), Dual Mode Diffusion of NaCl in Japanese Radish under Cooking Conditions, *J. Food Sci.*, **72**, C154-C162
- 15) Odake, S., Hatae, K., Shimada, A. and Iibuchi, S. (1990), Apparent Diffusion Coefficient of Sodium Chloride in Cubical Agar Gel, *Agric. Biol. Chem.*, **54**, 2811-2817
- 16) 化学大辞典編集委員会編 (1960), 「化学大辞典 9」, 共立出版, 東京, p. 303
- 17) 日本食品分析センター編 (2001), 「分析実務者が書いた五訂日本食品標準成分表分析マニュアルの解説」, 中央法規, 東京, pp. 16-27
- 18) 香西みどり, 中村文子, 畑江敬子, 島田淳子 (1998), 非等温加熱における最適加熱時間の予測, *家政誌*, **49**, 373-381
- 19) 久保田清, 藤本真紀子, 鈴木寛一, 高崎かほる, 保坂秀明 (1981), 球状根菜類系食品の熱拡散率の算出に関する研究, *日食工誌*, **28**, 68-73
- 20) 松崎淳子, 江原絢子, 山崎陽子, 松元文子 (1971), 食塩の食品への浸透について, *家政学雑誌*, **22**, 227-231
- 21) 山崎清子, 島田キミエ, 洪川祥子, 下村道子, 市川朝子, 杉山久仁子 (2011), 「NEW 調理と理論」, 同文書院, 東京, p. 24
- 22) 洪川祥子, 杉山久仁子 (2005), 「新訂 調理科学」, 同文書院, 東京, p. 4

(平成 24 年 5 月 2 日受付, 平成 24 年 11 月 12 日受理)

和文抄録

調理過程における根菜類中の NaCl 拡散係数および NaCl 濃度の変化について検討した。ダイコン, ニンジン, ジャガイモは 2 cm 角に成型し, 20, 50, 70°C で 16, 8, 6 時間 0.2 M NaCl 水溶液に浸漬し, 拡散係数を測定した。測定の結果, 拡散係数はダイコン>ニンジン>ジャガイモの順に大きく, 水分含量が多いほど拡散係数は大きかった。2 cm 角のダイコンを試料として 20°C の 0.2~0.8 M NaCl 水溶液における NaCl 拡散係数を測定したところ, この範囲での拡散係数の濃度依存性はほとんどみられなかった。測定した拡散係数を用いて, 温度変化, 濃度変化を伴う調理条件での各体積要素の平均食塩濃度の変化を予測したところ, 予測値と実測値はよく一致した。よって, 試料を 1mm³ の体積要素の集合体とし, 差分方程式を用いることで, 試料の食塩濃度の分布および全体の平均濃度の予測が可能であることを示した。