スチームコンベクションオーブン内における食塩 およびグルコースの食材中への拡散

多山賢二*・古田 歩**, ***§・荒木 彩*, 岡本洋子*・
谷本昌太****・橋場浩子*****

(*広島修道大学健康科学部, **山形県立米沢栄養大学健康栄養学部, ***前県立広島大学大学院
総合学術研究科, ****県立広島大学人間文化学部, *****東京聖栄大学健康栄養学部)

(平成30年4月14日受付, 平成30年10月10日受理)

Analysis of diffusion of sodium ion and glucose into food materials in steam convection oven

Kenji Tayama *, Ayumi Furuta **, ***§, Aya Araki *, Yoko Okamoto *,
Shota Tanimoto ****, Hiroko Hashiba *****

(§corresponding author)

* *Faculty of Health Sciences, Hiroshima Shudo University,*

1-1-1, Ozukahigashi, Asaminami-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima, 731-3195

** *Faculty of Health and Nutrition, Yamagata Prefectural Yonezawa University of Nutrition Sciences,*

6-15-1, Torimachi, Yonezawa-shi, Yamagata, 992-0025

*** *Graduate School of Comprehensive Scientific Research, Prefectural University of Hiroshima,*

1-1-71, Ujinahigashi, Minami-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima, 734-8558

**** *Faculty of Human Culture and Science, Prefectural University of Hiroshima,*

1-1-71, Ujinahigashi, Minami-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima, 734-8558

***** *Faculty of Health and Nutrition, Tokyo Seiei College,*

1-4-6, Nishishinkoiwa, Katsushika-ku, Tokyo, 124-8530

*〒731-3195 広島県広島市安佐南区大塚東1-1-1

**〒992-0025 山形県米沢市通町6-15-1

, *〒734-8558 広島県広島市南区字品東1-1-71

*****〒124-8530 東京都葛飾区西新小岩1-4-6

Mass transfer is important in many food processing methods, such as cooking, and it has been typical to assume a single diffusion coefficient (Fick's diffusion coefficient). However, we applied the combination theory of dual diffusion coefficient to the interpretation of the diffusion behavior of the sodium ion or glucose in several food materials during cooking (85°C), and the theoretical value showed a good agreement with the actual value. We then studied the diffusion of both the sodium ion (NaCl) and glucose in ingredients, such as konjac, pumpkin, fish paste, potato and heat-coagulated egg white, at 99°C using a steam convection oven. By incorporation of the contribution degree of dual Fick's diffusion coefficient, we could theoretically understand the diffusion phenomenon at 10% glucose and 3% NaCl except for konjac and potato. Especially, this analytical method was effective for the diffusion analysis of the sodium ion and glucose in pumpkin.

1. 緒 言

調理において素材への食塩や糖の浸み込みやすさを調べるために、食材およびゲルを浸漬する実験が、これまでいくつか行われてきた¹⁻⁴⁾。また、成分の浸み込みはフィックの法則に基づく1種類の拡散係数(以下、 D)を算出することで浸透速度が論じられてきた。ところが小見山らは、 D に濃度依存性が見られる特異な現象(高温長時間加熱時の大根中へのNaCl拡散)に着目し、染色の分野で提案された二元収着拡散理論をこれに適用したところ、この現象を理論的に説明できることを初めて明らかにした⁵⁾。その後、他の食材へも適用可能なことを示してきた⁶⁻¹¹⁾。

一方著者らは、この理論を基本としながらも、2種類の D とその寄与度を各々設定し、それを合計した食材中の理論的濃度が実測値とよく一致することを近年明らかにした¹²⁾。これにより、生や不均一な食材中での時間的経過に伴って変化する拡散や細孔のようなバイパス中の拡散の関与の度合いを数値で具体的に示すことが可能となり、食材中の拡散をイメージしやすくなった。

近年、病院や施設にさまざまな調理機器が導入されており、大量調理に適した調理機器の一つに、スチームコンベクションオープン^{13,14)}(以下、スチコン)を挙げることができる。専用容器に食材と調味液を投入し、加熱条件をセットするだけで調理が自動的に行われる。再現性が高いものの、省力化を優先する場合は、スチコン作動中に調味料や食材の新たな添加は避ける必要があることから、調理開始時において、使用する調味料および食材をすべて投入しておくのが好ましい。したがって、省力化と美味しい食事を両立させたい場合には、使用する食材の種類や大きさを考慮に入れながら、物性(硬さ等)や色の変化をはじめ、各食材中への各調味成分の浸み込み度合いを充分に把握しておく必要がある。

これまで、植物性食品を試料としてスチコンの加熱特性を検討した事例^{15,16)}や、スチコンで調理した煮物の品質について調べた報告^{17,18)}がある。しかし、スチコンでの煮物調理において、短時間加熱における調味成分の拡散に及ぼす影響を調べた報告は見当たらず、スチコン処理中での物質浸透に関する科学的知見は不足していた。

著者らは、スチコン処理中の各食材の物性や色の変化についてはすでに調べ、さまざまな特徴ある知見を見出してきている^{19,20)}。それらに加えて、今回はスチコン処理中のナトリウムイオン(以下、 Na^+)およびグルコースの拡散をモデル的に解析することとした。ただし通常、料理では複数の調味料を用いることが少なくないことから、NaClとグルコースの両者を溶解した水溶液を調味液とし、そこでの各々の物質の D を算出することとした。本実験では、10%グルコースと3% NaClを含む溶液を調味液と設定し、食材には、多糖類系固形食材としてのコンニャク(加熱加工品としての市販製品)のほか、デ

ンプン(炭水化物)系食材としてカボチャ(生)およびジャガイモ(生)、たんぱく質系食材としてカマボコ(加熱加工品の市販製品)および卵白熱凝固物(試作品)を用いた。実験の結果、コンニャクにおいては1種類の D で各々の調味成分の拡散が十分に説明できたものの、他の食材では2種類の D の設定が必要な場合があり、特にカボチャにおいては他の食材には見られない特徴的な知見が得られたので報告する。

2. 実験方法

(1) 材 料

ジャガイモは、広島県産の男爵イモを用いた。コンニャクは、マルキン食品製の「マルキン元気にゃくデカ判400g」であり、原材料として、こんにゃく製粉、海藻粉および水酸化カルシウム(凝固剤)が使用された市販加工食品を用いた。カボチャは、メキシコ産の西洋カボチャを用いた。カマボコは、山崎水産製の「蒲鉾やまさき」であり、原材料として、魚肉(たら)、卵白、食塩、でん粉、砂糖、発酵調味液、調味料(アミノ酸等)およびpH調整剤が使用された市販加工食品を用いた。

卵白熱凝固物は以下のように調製した。すなわち、市販卵の卵白部分のみを取り出し、これを十分に攪拌・混合した後、流し缶(12×8×4.5 cm)に入れたものを、フジマック製スチコンの90℃設定済みの機器内に移し、20分間保持して凝固物を得た。

これまで食塩の拡散の解析では、蒸煮固形化卵白(粉末卵白使用)、予備加熱ジャガイモ、予備加熱された魚のすり身が用いられてきた。しかし、実際の調理場面を想定すると、これらを使用することは稀であることから、容易に入手でき、調製も簡単で、上記と比較的近い食材として「生卵を使用して試作した卵白熱凝固物」、「生ジャガイモ」、「カマボコ(市販製品)」を用いることとした。これらに加えて、生ジャガイモに似た炭水化物系食材として生カボチャ、およびたんぱく系でも炭水化物系でもない多糖類系固形食材としてのコンニャクも使用し、これらの合計5食材に関して調べることにした。

グルコースはナカライテスク製の特級D-(+)-グルコースを、塩化ナトリウムは和光純薬製の特級品を使用した。

(2) 食材の浸漬および各深さでの断片取得方法

食材は直径20 mmのボーラーを用いて高さ25 mm以上の円柱状にくり抜いた。カボチャは種を除き、横長方向(種と果皮に挟まれる肉厚の部分)に、ジャガイモは縦長方向にくり抜いた。その他の食材はほぼ均一であるとし、25 mm以上の長さが確保できる方向にくり抜いた。溶液に直接当たる部位は平面になるよう切断し、その他の面は薄い天然ゴム製プローブカバー(株)清和産業、大阪、以下、薄ゴム)で被覆した。

この薄ゴムは伸縮性に富むことから破れにくく、食材

表面に密着する。水溶性青色色素であるメチレンブルーの水溶液に食材を浸して加熱する予備実験を上記同様にを行い、溶液と接する円柱形食材の表面側から円盤状に順次切断して青色の濃さを観察した。その結果、円盤状断片の外側部分が内側部分よりも濃い現象は観察されず、このことよりメチレンブルーの側面からの浸透がないことが確認された。以上の結果から、薄ゴムで覆うことで側面からの Na^+ およびグルコースの侵入を抑制できると判断した。

炊飯米とともに摂食する食場面を想定したことから、各食材は比較的高い濃度の調味液に浸漬させることとなり、予備検討の結果、10% (W/V) グルコースおよび3% (W/V) 塩化ナトリウムを含む溶液をモデル調味液とした。この500 mLをビーカーに入れ、これに薄ゴムで覆った円柱形の各種食材を投入し、ビーカーをアルミホイルで二重に覆った後、スチコン内に移した。スチコンはフジマック製コンビオープン（セルフクッキングセンター5センス、FSOC WE）を用いた。蒸気量100%、庫内温度160℃とし、予備実験により液温が99℃まで上昇するためには、スチコン内に移してから4分程度を有した。このことから、ビーカーをスチコン内に移して4分経過した時点を経過時間を99℃加熱時間0分とし、そこからの加熱時間を三段階で変えた。5、10、20分の各時間経過後、スチコンからビーカーを順次取り出し、その後直ちに食材部分をドライアイスと30分以上接触させて凍結させた。次に、各食材の各深さでの各成分の測定のために、表面側から順次断片を採取後、細かく破碎し、蒸留水で成分を抽出する一連の手法は、既報¹²⁾に準じて行った。

(3) 分析方法

Na^+ 濃度およびグルコース濃度の測定は、既報^{12,21)}の方法に従って行った。

(4) 見かけの拡散係数の算出

既報¹²⁾に準じて1種類の D (各深さの D の単純平均値)の算出を行い、実測値と理論値の一致度が不良な場合に

は2種類の D とその寄与度(%)の算出も行った。既報¹²⁾の記述のように、各深さにおける D が大きく異なる上に、1種類の D を拡散方程式に代入して計算された各深さにおける濃度のパターンが、実測値のパターンと大きく異なることがある。この場合には、パターンが実測値に比較的近いものを見出し、その D も提示した。これをパターン解析と呼ぶ。

なお、上述したようにスチコン内に食材入りの調味液を移すと、4分経過後に液温が99℃まで到達する。水溶液中において、98℃での NaCl の D は25℃でのその5倍程度であり^{10,22,23)}、4分間の温度上昇中の高温域での保持時間は短いことから、99℃での保持時間が長い場合には、この温度上昇中の時間を D の計算に際して無視することは特に問題ないと考えた。しかし、加熱時間5分では影響は大きい可能性があり、拡散時間を300秒(5分)と入力して計算することは、得られた D の値の信頼性の観点から避けるべきと判断した。したがって、加熱時間5分のデータは食材中の成分濃度のみ必要に応じて示し、加熱時間が10分および20分の場合に限定して D を含め詳しく解析することとした。

3. 実験結果

(1) ナトリウムイオンの見かけの拡散係数

コンニャク、カマボコ、卵白熱凝固物、ジャガイモおよびカボチャの5食材について、グルコースおよび NaCl を含む水溶液に浸漬し、99℃で加熱処理した後、表面から順次切片を取り出し、 Na^+ の濃度を測定することで、拡散係数を算出した(表1)。ただし、カマボコにおいては、10分の濃度パターンと20分のそれとが、ほぼ一致したことから(図1)、10分以降の拡散がないと判断できたため、20分経過時の拡散係数の算出は行わなかった。本実験と同一製品のカマボコの2 cm角の立方体を用いて著者らが行ったスチコンの同一条件での実験においても、カマボコ内の Na^+ 濃度が10分と20分とは有意差がないことが示されており(データ未掲載)、図1の結果を支持した。

図1 スチコン中のカマボコ内でのナトリウムイオンおよびグルコースの濃度分布

表1 各解析方法で得られたナトリウムイオンの拡散係数

材料	処理 時間	Dの平均値	左記の 一致度	(回帰直線の傾き) (回帰直線の決定係数)	→	パターン 解析でのD	左記の 一致度	(回帰直線の傾き) (回帰直線の決定係数)	→	D (1)	D (1)の 寄与度	D (2)	D (2)の 寄与度	2種のDに よる一致度	(回帰直線の傾き) (回帰直線の決定係数)	参照
コンニャク	10分	11	A	(1.099) (0.9944)												図 2
	20分	5.3	AA	(1.048) (0.9963)												
カマボコ	10分	11	C	(1.128) (0.9819)	→	12	C	(1.148) (0.9845)	→	11	90%	1.0	10%	B	(1.058) (0.9808)	図 1
	20分	*														図 1
卵白熱凝固物	10分	12	B	(1.104) (0.9977)	→	13	B	(1.110) (0.9987)	→	16	70%	3.5	30%	AA ↓	(0.957) (0.9964)	図 3
	20分	6.7	AA	(1.045) (0.9991)						16	40%	3.5	60%	AA	(1.043) (0.9964)	
ジャガイモ	10分	6.9	B	(0.903) (0.9873)	→	7.2	A	(0.941) (0.9918)								
	20分	7.3	A	(0.980) (0.9954)												
カボチャ	10分	4.8	B	(1.120) (0.9953)	→	3.5	A	(1.060) (0.9993)		5.0	70%	0.6	30%	AA ↑	(0.972) (0.9985)	図 4
	20分	8.4	C	(1.389) (0.9665)	→	5.0	C	(1.282) (0.9581)	→	15	50%	0.6	50%	A	(0.994) (0.9943)	

*：処理20分は処理10分と比較して、各部位で濃度上昇がなかったことから、拡散が見かけ上止まっており、解析は未実施。→：解析の流れ
一致度：AA：決定係数が0.9960以上でかつ傾きが0.950～1.050の場合、A：決定係数が0.9900以上でかつ傾きが0.900～1.100でかつAAに該当しない場合
B：Aでの決定係数、傾きのどちらかの条件を満たさない場合
C：Aでの2つの条件（決定係数、傾き）をともに満たさない場合、決定係数にかかわらず傾きが0.80～1.20に入らない場合、傾きに関係なく決定係数が0.90以下の場合
D：拡散係数×10⁻⁵cm²/sec

表1において、1種類の D で一致度がAAもしくはAで表されるものは、実測値と理論値が良い一致を示すことを意味している。コンニャク（10分および20分）、卵白熱凝固物（20分）およびジャガイモ（20分）が該当し、代表例として図2にコンニャクの99℃・20分加熱時の結果を示した。しかし、カマボコ（10分）、卵白熱凝固物（10分）、ジャガイモ（10分）およびカボチャ（10分、20分）では十分な一致度を示さなかったことから、パターン解析へと移った。これにより、ジャガイモ（10分）およびカボチャ（10分）では一致度が良好になったものの、残りの三者は一致度が向上しなかった。そこで、既報¹²⁾に

準じて2種類の D とその寄与度を設定して合計する解析手法を適用したところ、一致度の向上が認められた。特に、卵白熱凝固物（10分）およびカボチャ（20分）ではAランク以上となった（図3、図4）。次に、同一食材での他の加熱時間にも適用したところ、カボチャ（10分）において、1種類の D のパターン解析よりも、一致度がやや向上した。

2種類の D の設定によって、カボチャでは高い一致度を示したことから、20分加熱のより高い一致度を目指して、食塩で提唱された小見山らの二元収着拡散理論⁵⁾を用いて解析した。しかし、実測値をもとに算出された

図2 コンニャクの加熱時の各深さでのナトリウムイオン濃度の実測値と理論値（99℃・20分）

図3 卵白熱凝固物の各深さでのナトリウムイオン濃度の実測値と理論値（99℃・10分）

左半分：理論値は拡散係数を13とした場合

右半分：理論値は2種類の拡散係数を設定し、16（70%）& 3.5（30%）とした場合 単位： $\times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$

図4 カボチャの加熱時の各深さでのナトリウムイオン濃度の実測値と理論値 (99°C・20分)

左端：理論値の拡散係数は8.4 中央部：理論値の拡散係数は5.0

右端：理論値は2種類の拡散係数を設定し、15 (50%) & 0.6 (50%) とした場合 単位： $\times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$

D と理論値の D とはほとんど一致せず、この理論の適用は困難であった。

(2) グルコースの見かけの拡散係数

上述の5食材での実験において、グルコース濃度を測定して算出した拡散係数の結果を表2に示した。ただし、カマボコにおいては、 Na^+ 同様、10分の濃度パターンと20分のそれとが、ほぼ一致したことから、20分経過時の拡散係数の算出は実施しなかった(図1参照)。本実験と同一製品のカマボコの2cm角の立方体を用いて著者らが行ったスチコンの同一条件での実験においても、カマボコ内のグルコース濃度が10分と20分とは有意差がないことが示されており(データ未掲載)、図1の結果を支持した。

試料の内部温度が室温から99°Cに達するまでは4分以上を要するため、カボチャではデンプンやショ糖から組織内酵素反応によってグルコースが生成される可能性がある。そこで、マルトースおよびフルクトースのスチコン加熱中での増加について調べたが、その傾向は認められず(データ未掲載)、グルコースのカボチャ内部での濃度上昇は調味液からの拡散によるものと判断された。

表2において、パターン解析も含めて、1種類の D で一致度がAAもしくはAで表されるものは、カボチャを除くすべてであった。次に、既報¹²⁾に準じて2種類の D とその寄与度を設定して合計する解析手法をカボチャに適用したところ、一致度の向上が認められた。特に、カボチャ(10分)ではAランクとなった(図5)。

(3) 濃度プロファイルによる解析

拡散物質濃度を縦軸に、換算距離($\eta = x/2t^{1/2}$, x は深さ, t は時間)を横軸に取って解析する「濃度プロファイル分析」^{5,6)}を行ったところ、20分加熱は10分加熱と良好な重なりを示すものがなく、少なくとも20分までは今回用いた基質(食材)すべての状態が変化していることが示された。例えば、製造工程中に加熱処理がなされているコンニャク(製品)でさえも図6に示したように、10分加熱と20分加熱とでは Na^+ 、グルコースのいずれの場合においても、濃度プロファイルでの重なりは認められなかった。

4. 考 察

今回の実験では、スチコンでの庫内温度160°Cの加熱時間は20分を最長とした。加熱時間30分も検討したが、軟らかくなり過ぎる、味(塩味と甘味)が濃すぎる、白色系食材ではアミノカルボニル反応が顕著に進んだ結果、褐変し過ぎることが明らかとなり、5食材で共通する加熱時間として、10分から20分の設定とした。暖かい御飯(白米)とともにこれら調理食材を喫食した場合、塩味と甘味のバランスとこれらの強さ点で特に問題がないことを確認した。このように今回の実験は、実際の大量調理にて実施される可能性のある条件で行われたと考えている。

Na^+ に関して実測値と理論値の一致度が最も高かった解析手法に絞って表1の D をみると、 $10 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ (以下、 D の表示では $\times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ は共通するため省略)

表2 各解析方法で得られたグルコースの拡散係数

材料	処理時間	Dの平均値	左記の 一致度	左記の 一致度	パターン 解析でのD	左記の 一致度	(回帰直線の傾き) (回帰直線の決定係数)	→	D(1)	D(1)の 寄与度	D(2)	D(2)の 寄与度	2種のDに よる一致度	(回帰直線の傾き) (回帰直線の決定係数)	参照
コンニャク	10分	4.5	B	(1.129) (0.9980)	→	4.0	A	(1.086) (0.9946)							
	20分	1.7	AA	(1.016) (0.9984)											
カマボコ	10分	2.9	AA	(1.027) (0.999)											図1
	20分	*													図1
卵白熱凝固物	10分	5.3	B	(1.190) (0.9971)	→	3.5	A	(1.0985) (0.991)							
	20分	3.5	A	(1.060) (0.9994)											
ジャガイモ	10分	2.8	A	(1.077) (0.9956)											
	20分	2.7	A	(1.062) (0.9995)											
カボチャ	10分	4.8	C	(1.293) (0.9538)	→	2.3	C	(1.138) (0.9813)	→	15	30%	0.7	70%	A (0.982) (0.9946)	図5
	20分	5.0	C	(1.387) (0.9382)	→	2.0	C	(1.091) (0.8869)	→	15	40%	0.5	60%	B (0.953) (0.9855)	

*：処理20分は処理10分と比較して、各部位で濃度上昇がなかったことから、拡散が見かけ上止まっており、解析は未実施。→：解析の流れ
一致度：AA：決定係数が0.9960以上でかつ傾きが0.950～1.050の場合、A：決定係数が0.9900以上でかつ傾きが0.900～1.100であってAAに該当しない場合
B：Aでの決定係数、傾きのどちらかの条件を満たさない場合
C：Aでの2つの条件（決定係数、傾き）をともに満たさない場合、決定係数にかかわらず傾きが0.80～1.20に入らない場合、傾きに関係なく決定係数が0.90以下の場合
D：拡散係数 $\times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$

図5 カボチャの加熱時の各深さでのグルコース濃度の実測値と理論値 (99℃・10分)

左端：理論値の拡散係数は4.8 中央部：理論値の拡散係数は2.3

右端：理論値は2種類の拡散係数を設定し、15 (30%) & 0.7 (70%) とした場合 単位： $\times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{sec}$

図6 加熱時間を変えた際のコンニャク中のナトリウムイオンおよびグルコースの濃度プロファイル

X: コンニャク表面からの距離 (cm), t: 加熱時間 (秒)

を超えるものが、ジャガイモ以外の食材で認められた。水溶液中での NaCl の D は98℃で5.6との報告があることから¹⁰⁾、10を超える数値は食材中での細孔の存在の可能性を示唆している。一方、コンニャクのみに、スチコン処理による有意な重量の減少が認められ、スチコン加熱時間が長いほど、コンニャクの重量減少率が高まっていた (データ未掲載)。コンニャクを立方体と仮定した場合、加熱前と比べて一辺の長さが、加熱10分では2.7%縮小したのに対し、加熱20分では4.2%縮小したと算出された。このことから、コンニャクの D が11 (10分加熱) から5.3 (20分加熱) へと減少したのは、多糖類であるグルコマンナンのネットワーク構造の高密度化が全体の収縮によって生じ、 Na^+ 侵入経路となる孔が縮小化した

可能性が考えられた。

たんぱく質系食材であり、浸漬前に高温加熱処理済みとなっているカマボコおよび卵白熱凝固物では、 Na^+ の D が10を超える細孔の存在の可能性に加えて、 D が1.0あるいは3.5で示される Na^+ の流れも示唆された (表1)。両食材ともに、スチコン加熱時間の延長に伴って拡散が緩慢になっており、図1に示したように、カマボコでは加熱10分で見かけ上の Na^+ 拡散はほぼ停止した。卵白熱凝固物では2種類の D による Na^+ 拡散解析で、加熱20分において、 D が3.5の拡散の寄与度が加熱10分よりも2倍に上昇している (表1)。しかし、全体平均といえる1種類の D の平均値が約1/2に低下していることから、拡散の緩慢化が生じているのは明らかであり、むし

ろ D が3.5の拡散は維持された上で、 D が16で示される細孔が減少した可能性も示唆された。一方、炭水化物（デンプン）系食材のジャガイモおよびカボチャにおいては、スチコン加熱20分以内では全体平均としての Na^+ の1種類の D の平均値の低下はなかった。特にカボチャにおいては他の食材と異なり、加熱20分は10分よりも高い平均 D を示し、加熱中の構造の変化が示唆された。

次にグルコースに関して実測値と理論値の一致度が最も高かった解析手法に絞って表2の D をみると、10を超える結果は Na^+ とは対照的に非常に少なかった。 Na^+ と比べて電荷をもたず分子量も大きいグルコースでは、 Na^+ のような複雑な拡散は生じにくいと考えられる。ただしカボチャのみが例外であり、大きく異なる2種類の D の設定が、実測値と理論値の一致に必須であった。今回用いた5食材について、2 cm 角の立方体に切断し、スチコンを用いて同様な条件・調味液中で加熱し、硬さ荷重を測定する実験を我々は行っている（詳細データは省略。ただし直径8 mm のプランジャーを使用、50%圧縮、圧縮速度1 mm/秒、テクスチャー解析モード）。それによると、5食材中、加熱時間の延長に伴い有意な硬さ荷重の低下が認められたのはジャガイモおよびカボチャであり、加熱5分では各々14 N および6.6 N、加熱20分では各々6.9 N および1.1 N であった。この両食材は、生の状態では上記の条件で測定上限（20 N）を超えるため、食材を1 cm 角の立方体まで小さくし、プランジャーの直径を3 mm まで縮小して上記同様に測定したところ、生ジャガイモでは12 N、生カボチャでは18 N であった。このように、浸漬加熱を行うとジャガイモよりもカボチャの方が硬さの低下の割合が大きいことが明らかになっている。また、浸漬加熱中に変化を生じやすい生サツマイモの場合に、2種類の D の設定による理論値が実測値とよく一致することがすでに報告されている¹²⁾。したがって、炭水化物（デンプン）系食材の生を材料として用い、加熱中に物性（硬さ等）が変化しやすい場合には、物質拡散速度も影響を受け、結果的に2種類の D の設定による理論値が実測値と一致しやすくなる可能性が考えられた。さらにカボチャにおいて興味深いのは、実測値と一致する Na^+ とグルコースの2種類の D の数値および寄与度が、特に20分加熱で近接していることである。これがスチコンに特異的な現象であるのかを含め、この現象が起きる理由について今後検討していく必要がある。

カマボコの原料となる冷凍すり身には、一般的に冷凍変性防止剤として糖類が添加され、カマボコ製造の際には原材料表示から明らかなように砂糖も使用されていた。このため、グルコースの拡散は10分以降が抑制されたと考えられた。 Na^+ の拡散の10分以降の抑制も、内在する食塩の影響によるものと推察された。

今回のスチコン加熱中での Na^+ の D を全体的にみると、これまでの報告^{8,10,11)} よりも高い傾向にある。一般に D

の算出では、理論的表面濃度を実測値プロットの回帰分析から算出するため、浸漬時間が短い場合は、理論的表面濃度は浸漬に使用した液中に含まれる濃度よりも低くなり、その結果として D は高めに出る傾向がある。これまでの報告では、生のジャガイモを98℃で40分間、蒸煮処理し、これを用いて98℃の3% NaCl に50分浸漬した場合、NaCl の D は1.1~4.4であった¹⁰⁾（表面からの深さにより異なる）。しかし、我々がスチコンで99℃・20分加熱したジャガイモの D は7.3であるため（表1）、上述の影響が考えられる。

一方、80℃の3% NaCl に100分浸漬した際に得られたNaCl の D に関する過去の報告では⁸⁾、80℃20分の蒸煮によって粉末卵白の懸濁液を固形化した卵白を用いた場合、0.96~6.2であったとしている（表面からの深さにより異なる）。今回、我々が行った卵白熱凝固物のスチコン加熱で算出された Na^+ の D は20分加熱で6.7であり、過去の報告を上回る値であった。この両者では卵白素材が異なることに加え、固形化の際の温度や時間が両者で異なっており、蛋白変性の進行（液状から固形物への変化）の程度も明らかになっていない。そのため違いを考察することは難しく、今後食場面を意識した条件を設定した上で Na^+ 拡散に関する知見が固形化卵白で整理されることが望まれる。

グルコースにおいても、 D の平均値はこれまでの報告^{2,12)} よりも高い傾向を示したが、今回の5食材間では大きな違いは認められなかった。試作コンニャクを用いた100℃（浸漬時間不明）での拡散実験にて、 D が3.3であったとの報告がなされている²⁾。多孔性のほか、膜電位（負の電荷）も小さいことから、コンニャクは低分子やイオンの透過性が高いとされている²⁰⁾。今回の市販のコンニャクを用いた実験で、 D は10分で4.0、20分で1.7であり、顕著な違いではなかった。カボチャを除く4食材において、10分および20分の加熱では1種類の D で拡散現象が説明可能で数値も近く、特に10分加熱では2.8~4.0の範囲であった。このことから、この4食材中へのグルコースの拡散速度は同程度であることを意味しており、スチコン短時間加熱による実際の調理場面への応用が期待される。

Hashiba らによる報告^{8,10,11)} では、タラのすり身（浸漬：98℃・60分）、固形化卵白（浸漬：80℃・100分）および98℃・40分蒸煮ジャガイモ（浸漬：98℃・50分）でのNaCl の拡散は、二元収着拡散理論に完全に適合している。比較的似た食材ではあるものの、これらとは異なる今回の我々の実験条件において得られた結果はこの理論には適合しなかった。しかし、2種類の拡散係数の設定が必要な点では一致している。一方で、「濃度プロファイル分析」^{5,6)} ではスチコン加熱の10分と20分とでは一致する食材が皆無であった。製品化に際して高温加熱されるコンニャクでさえも同様な結果であったことから（図6）、庫内温度160℃のスチコン内では、少なくとも20分まで

は基質（食材）の状態は変化し続けていることを示している。したがって、2種類の拡散係数とその寄与度の設定が実測値とよく一致していても、実際の食材中でも2種類の独立した拡散が生じているとは限らない。再現よく試作できるモデル固形食材などを用いて詳細な検討を行い、見かけ上一致するという現象を明らかにしていく必要があると考えている。

5. 要 約

調理中の調味成分の浸透を調べることは重要であり、1種類のフィックの拡散係数が設定され解析されてきた。しかし我々は、高温の調理条件下において、いくつかの食材を用いた場合、食塩もしくはグルコースの拡散現象の説明に、2種類の拡散係数を組み合わせる理論が適用できることを示してきた。本報では、品温が99℃のスチームコンベクションオーブン内（庫内設定温度160℃）で、コンニャク、カボチャ、カマボコ、ジャガイモ、卵白熱凝固物でのナトリウムイオンおよびグルコースの両者の拡散を調べた。その結果、2種類のフィックの拡散係数と寄与度を設定し合計する理論の適用によって、コンニャクとジャガイモを除いた食材において、10%グルコースと3%塩化ナトリウムの両者を含む溶液中での各物質の拡散の理論値と実測値は良い一致を見た。特に、カボチャにおけるナトリウムイオンとグルコースの拡散の解析では、興味深い結果を得た。

文 献

- 1) 酒井信：魚肉における糖類の挙動，日本食品工業学会誌，39，1119-1122（1992）
- 2) 八島恵美子，福本由希，飯淵貞明：調理温度が調味料浸透速度に与える影響，和洋女子大学紀要 第37集（家政系編）p.45-56（1997）
- 3) Odake S, Hatae K, Shimada A, Iibuchi S: Apparent diffusion coefficient of sodium chloride in cubical agar gel, *Agric. Biol. Chem.*, 54, 2811-2817（1990）
- 4) 山本修一：物質移動物性としての拡散係数と水分吸脱着（乾燥），日本食品工学会誌，11，73-83（2010）
- 5) 小見山二郎，橋場浩子，牛腸ヒロミ，仲西正：調理時における呈味成分の食材中への拡散，序論—二元収着拡散染色理論の適用—，日本海水学会誌，58，404-412（2004）
- 6) 橋場浩子，根本勢子，牛腸ヒロミ，小見山二郎：98℃における，加熱凝固した卵白中のNaClの二元収着拡散—速報，聖徳栄養短期大学紀要 No.35, 14-19（2004）
- 7) Hashiba H, Komiyama J, Nakanishi T, Gocho H: Dual mode diffusion of NaCl in Japanese radish under cooking conditions, *Journal of Food Science*, 72, C154-C162（2007）
- 8) Hashiba H, Gocho H, Komiyama J: Dual mode diffusion and sorption of sodium chloride in pre-cooked egg white, *LWT-Food Science and Technology*, 41, 1978-1986（2008）
- 9) Hashiba H, Gocho H, Komiyama J: Dual mode diffusion and sorption of sodium chloride in poek meats under cooking conditions, *LWT-Food Science and Technology*, 42, 1153-1163（2009）
- 10) Hashiba H, Gocho H, Komiyama J: Dual mode diffusion and sorption of sodium chloride in pre-cooked potato (*Solanum tuberosum* L.) , *Journal of Food Research*, 2, 66-79（2013）
- 11) Hashiba H, Gocho H, Komiyama J: Dual mode diffusion and sorption of sodium chloride in surimis under cooking conditions, *Journal of Food Engineering*, 137, 101-109（2014）
- 12) 多山賢二，岡本洋子，橋場浩子：非加熱・加熱食材でのNaCl・グルコースの拡散における2種のフィックの拡散係数を用いた解析，日本食生活学会誌，28，169-178（2017）
- 13) 山崎清子，島田キミエ，渋谷祥子，下村道子，市川朝子，杉山久仁子：NEW 調理と理論，同文書院，東京，p.42（2011）
- 14) 渋谷祥子：スチームコンベクションオーブン，日本調理科学会誌，35，106-107（2002）
- 15) 山田晶子，杉山智美，渋谷祥子：スチームコンベクションオーブンの加熱特性，日本家政学会誌，53，331-337（2002）
- 16) 村元美代，安部恵，板垣千尋，大友佳織：調理におけるスチームコンベクションオーブンの特徴，修紅短期大学紀要，28，89-95（2007）
- 17) 神田知子，有馬紗耶，藤本理瑛，中西美穂，小原友香梨，小切間美保：スチームコンベクションオーブン調理と真空調理による水溶性ビタミンB₁・B₂・B₆・Cの調理損失の比較—かぼちゃの煮物について—，日本給食経営管理学会誌，6，65-73（2012）
- 18) 神田知子：スチームコンベクションオーブン調理と真空調理の野菜の煮物の品質について，日本調理科学会誌，47，230-232（2014）
- 19) 古田歩，多山賢二，阿部典子，岡本洋子，谷本昌太：スチームコンベクションオーブンにおける加熱条件がカボチャの物性と調味成分の浸透に及ぼす影響，日本食生活学会誌，28，271-278（2018）
- 20) 古田歩，多山賢二，荒木彩，濱川祐実，岡本洋子，谷本昌太：スチームコンベクションオーブン加熱による各種食材のテクスチャーおよび浸透量の変化，日本家政学会 中国・四国支部 研究発表会講演要旨集，p.17（2017）
- 21) 多山賢二，住田初美，岡本洋子：グルコン酸含有調理品の嗜好性および高濃度グルコン酸発酵液の調製，日本食生活学会誌，22，241-249（2011）
- 22) 田中宗彦：食品加工・貯蔵における塩の機能と役割，日本海水学会誌，52，352-358（1998）
- 23) 牛木秀治，岡田勲，高橋洋一，田中和子，橋谷卓成：拡散，化学便覧 基礎編，日本化学会編（丸善，東京），p.Ⅱ-58-63（1993）
- 24) 中垣正幸，宮田堅司，北河修治，秋山太一郎：コンニャク膜の膜電位と電解質透過性，膜，2，47-53（1977）