

炭水化物食材(じゃがいも)中の NaCl の二元収着拡散

橋場 浩子¹, 牛腸 ヒロミ²¹東京聖栄大学健康栄養学部管理栄養学科,²実践女子大学生活科学部生活環境学科

概要 <研究目的> これまで、世界的に食材中の NaCl の拡散は、濃度が 1~5 mol/kg の水溶液中からの拡散過程として研究されてきた。このような高塩濃度の条件下では、フィックの拡散係数、 D 、は濃度によらずほぼ一定値になるため、濃度依存をしないと考えられてきた。ところが、1995 年以後、豚肉、チーズなどで NaCl の D は比較的低い濃度領域で食材中の塩濃度と共に、顕著に減少することが報告されている。しかしこのような D の変化に対する説明は、全くなされていない。私たちは、3% (0.5 mol/kg) の NaCl 溶液からの食材中への NaCl の拡散を、一次元の拡散として測定する簡便な方法 (FRITRUC 法) を考え、本研究に先だって大根、凝固卵白、豚肉中の異なる塩濃度での D を求め、これらの D が特定の濃度で極大を示すことを明らかにしてきた。水を含む高分子基質中の塩の拡散係数が、極大を示す変化を説明できる理論として、小見山らの 1974 年の二元収着拡散理論がある。異なる程度に水で膨潤した、基質高分子相のうち非荷電部分への分配型 (p 型) 収着と荷電した部分へのラングミュア型 (L 型) の収着との二元収着を考え、それぞれの種の真の拡散のし易さ (熱力学的拡散係数、 D_T) が、L 型のほうが p 型より速いと考えて作られた式である。食材中の NaCl の拡散も、含まれる液体水中の拡散で決まるのではなく、律速となる水で膨潤した基質中の拡散で決まると考えた方がよい。この理論と D の極大を示す実験結果とが整合的であると考えて、これまでの研究を行ってきた。本研究では、炭水化物食材としてじゃがいもを取り上げ、大根の結果と比較しつつ、じゃがいもについて、30°C~98°C での D の濃度依存を測定し、温度による D_T の変化を二元収着拡散理論によって説明することを試みる。

<研究方法> 薄いゴムで被覆した円柱形の食材を 3% NaCl 溶液に浸漬し、濃度プロファイルを得た。このプロファイルに俣野の式を適用し、 D を算出した。極大を示す D vs. C の曲線に五次式を適用し、平衡に関するパラメータ α 、収着座席濃度 S 、熱力学的拡散係数 $D_T(L)$ および $D_T(p)$ を求めた。

<結果および考察> 予備加熱したじゃがいも中の NaCl の D も大根や凝固卵白や豚肉と同様に、ある濃度で極大を示す濃度依存を示した。この曲線に二元収着拡散理論を適用し、4つのパラメータを得た。2つの D_T は 50~70°C の間で大きな変化を見せたが、これは基質中のガラス転移によるものと推察した。このように、基質の状態の変化が熱力学的拡散係数に影響を及ぼすことから、拡散の律速段階は液体水中にあるのではなく基質中にあると結論した。これらのパラメータを用いて、僅かに上に凸の収着等温線も再現することができた。以上の結果から、これまでの4つの食材中の NaCl の拡散は、二元収着拡散理論で統一的に説明できることが分かった。

1. 研究目的

一般に 60~90% の含水率を持つ食材中の NaCl の拡散は、これまで世界的に、濃度が 1~5 mol/kg の水溶液中からの拡散過程として研究されてきた。このような高塩濃度の条件下では、実際に測定されるフィックが定義した濃度勾配に対する係数としてのフィックの拡散係数、 D 、

は、濃度によらずほぼ一定値になるため、塩は食材中の曲がりくねった液体水の通路 (曲路) の中を拡散すると考えられてきた。この場合、食材の種類、状態によって曲路率が大きくなると D が小さくなるが、NaCl 濃度によって D が変わることはない。ところが、1997 年以後、我々の報告も含めて食材中の NaCl の D はある塩濃度では極大を示

し、それ以上の濃度では、塩濃度とともに減少することが、6報報告されている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。しかし従来はこのようなDの変化に対する説明は、全くなされていない。

私たちは、3.00% (0.513 mol/kg) の溶液からの食材中へのNaClの拡散を、一次元の拡散として測定する簡便な方法(FRITRUC法)を考案して、3つの食材中の異なる塩濃度でのDを求めてきた。大根を例にとると、そのDは高塩濃度では水中での値の1/2以下であるが、0.05 mol/kg付近で、2~5倍の大きさの極大を示すことが明らかになった³⁾⁴⁾。大根は95%の水を含んでいるので、もし液体水の通路を流れるならば、このようにDの絶対値が大きな濃度依存を示すことは決してありえない。大根中の塩の拡散機構はこのようなDの変化を説明できるものでなければならない。

高分子基質中の塩の拡散係数の極大を示す変化を説明できる理論が、知る限りではただ一つある。それは研究協力者の小見山らが1974年に報告した「二元収着拡散理論」である⁷⁾。基質高分子相のうち水相の少ない非荷電部分への分配型(p型)収着と、荷電のため、より水和した部分へのラングミュア型(L型)収着との二元収着を考え、それぞれの種の真の拡散のし易さ(熱力学的拡散係数、 D_T)が、L型のほうがp型より速いと考えて作られた式である。この考えによると、食材中の塩の拡散は、含まれる液体水中の拡散で決まるのではなく、律速となる水で膨潤した基質中の拡散で決まると考えた方がよい。じゃがいもの場合、澱粉の糊化や変性蛋白質のガラス転移による基質の変化が起こり、拡散挙動にも大きな変化が観察されることが予測できる。

今回、炭水化物食材としてじゃがいもを取り上げる前に、大根と凝固卵白と豚肉についてNaClのDの絶対値の大きさと濃度に依存する変化を説明することができた。このように、実験方法(FRITRUC法)と得られた結果の理論的取り扱いを、3つの食材について確かめた上で、本研究では、じゃがいもについて30°C~98°CでのDの変化を測定し、他の食材と同様に極大を示す結果が得られたので、二元収着拡散理論によって説明することを試みる。

2. 研究方法

2.1 モデルと理論

一般に食材は液体水相と水で膨潤した基質相からなる。

NaClのようなイオン性拡散質は液体水相に分配(p型)で収着される。また膨潤基質中にはp型とラングミュア(L型)で収着すると考える。この考えに基づき、食材基質への平衡収着について(1)式が適用できる。

$$C_t = C_w + C_p + C_L = (1 - \beta)C_s + K_p C_s + \frac{K_L S C_s}{1 + K_L C_s} \quad (1)$$

ここで C_t は食材中の任意の位置でのNaClの全濃度(mol/kg)、 C_w は液体水相中のNaCl濃度(mol/kg)、 C_s は外液のNaCl濃度(mol/kg)、 C_p は食材中のNaClのp種の濃度(mol/kg)、 C_L はNaClのL種の濃度(mol/kg)、 β は全質量中の水で膨潤した基質の分率、 K_p はp型収着の平衡定数(= $\beta K_p'$)、 K_L はL型収着の平衡定数(kg/mol)を表わす。二元収着は、水と基質領域に起こるが、この領域中の2種のNaClの濃度は液体水領域も含めた食材の全質量に対する分率、 r として定義する。液体水を含む材料中では、1974年の小見山らの定義を

$$K_a = r \frac{K_L}{K_p}, S_a = \frac{S}{r} \text{ と再定義すると、} K_a \text{ は} \\ \alpha = K_a S_a = \frac{K_L S}{K_p} \quad (2)$$

となる。

第二に、p種とL種のNaClの間の平衡に関する速度は、pおよびLの領域での拡散速度に比べて速いと仮定する。これは必ずしも単純化のための仮定ではなく、ある特定の領域がpやL領域に固定されていない、基質の非荷電および荷電領域中の分子の熱運動により、電荷が三次元空間内で動くために、ある場所のNaClは時に応じてp種にもL種にもなると考えられるからである。この速い平衡を仮定することにより、基質中のNaClのイオンの化学ポテンシャルは、pとLの種にかかわらず同じになる。このことから拡散は同じ化学ポテンシャル勾配で起こることになる。 Na^+ と Cl^- は電気的中性という制約により、対で拡散すると考える⁸⁾。この基本的なモデルの上に式を導くと、基質中のNaClの濃度プロファイルから評価したフィックの拡散係数は、(3)式のように表される。

$$D(C_t) = D_p + D_L \\ = D_T(\text{p}) \frac{1}{\alpha(1-\theta)^2 + 1} + D_T(\text{L}) \frac{\alpha(1-\theta)}{\alpha(1-\theta)^2 + 1} \quad (3)$$

ここで $D(C_t)$ は食材中の全濃度 C_t でのNaClのフィックの拡散係数、 D_L は膨潤した基質中でのNaClのL型のフィ

ックの拡散係数、 D_p はp型のフィックの拡散係数、 α は(2)式で与えられ、 θ はL型の収着座席の飽和度(C_L/S_a)である。 α と θ は無次元のパラメータであるので、この式はNaCl濃度などの単位の取り方によらず成立する。これまでの研究では、 K_L は K_p より充分大きいので、 α は S_a の数倍~100倍以上になる。(3)式によれば、フィックの拡散係数は、易動度のみの関数である2つの D_T と平衡因子 α の関数との積の2つの項の和となる。(3)式の第2項は、 C_t すなわち θ の増加と共に極大を持つ変化を示し、 α の増加と共に極大値が大きくなる。簡単のために、 $D_T(p)$ が $D_T(L)$ と同じと仮定しても極大を与えるNaCl濃度以下での、 $D(C_t)$ は大部分 D_L 項に由来することがわかる。 D_p 項の寄与は、 D の極大に対応する $C_{b,max}$ を超えた濃度で実質的に寄与するようになる。 $D_T(p)/D_T(L)$ 比と α が異なる場合について大まかに見積もった $D(C)$ の変化は、本研究の基礎となる研究に示されている⁷⁾。

この項の始めに、食材が液体水相と水和基質相の2つの相で成り立っていることを述べたが、今まで述べたモデルと理論の項を要約すると、NaClは液体水領域でのp型、水和基質領域でのpおよびL型収着の3つの機構で収着される。濃度 C_s の溶液から食材全体に収着されたNaClの濃度 C_t は(1)式で与えられる。(1)式では K_p' を水和基質中の水へのNaClの分配係数として、(1)式の K_p を、 $\beta K_p'$ で表した。(1)式によるとNaClの収着等温線は、 $(1-\beta+\beta K_p')C_s$ と $K_L S_a C_s / (1+K_L C_s)$ の2つの項からなり、それぞれ C_s に比例する項と、上に凸の曲線を与える項から成ることが分かる。(1)式中で $K_a (=K_L/K_p)$ は D の変化から求められるので、 β と K_p' を合理的に仮定してすべてのパラメータを決め、収着等温線にベストフィットする曲線を得ることができる。**Fig. 1**にこの模式図を示す。この図から食材中の拡散速度を決める経路である含水基質中のNaClの割合は、液体水中のそれに比べて、かなり小さいことがわかる。

2.2 予備加熱試料

じゃがいもは短径6 cm、長径10 cm程度の、煮崩れしにくい粘質のシンシア種を選んだ。青森県産シンシア種をまとめて購入したものを4°Cに貯蔵して保存し、実験前日より常温放置して用いた。中心部から直径5.0 cm、長さ6.0 cmの円柱を切り取り、98°Cで40分蒸し加熱をした。この予備加熱処理をしたじゃがいもから、さらに拡散濃度プ

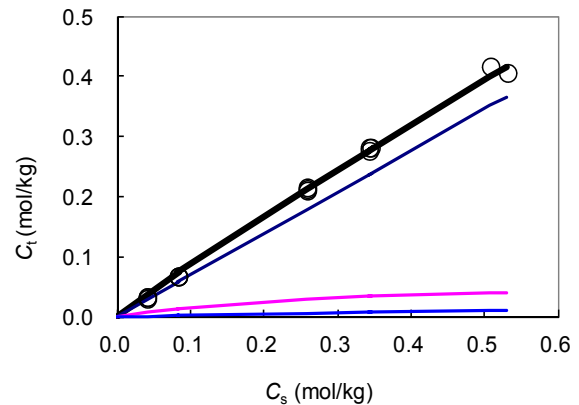


Fig. 1. Aschematic representation of sorption isotherm. ○, experimental. —, theoretical C_t ; —, theoretical C_w ; —, theoretical C_L ; —, theoretical C_p .

ロファイルおよび収着等温線測定用試料を切り取った。

2.3 試料のSEM写真

走査電子顕微鏡(日本電子(株), JSM-6380)により、試料の断面のナチュラルSEM観察を行った。測定条件は、無蒸着、低真空反射電子立体像、加速電圧15kVで行った。この観察は日本電子(株)のご好意による。

2.4 成分分析

日本食品成分表の分析法に基づいて、生および予備加熱したじゃがいもの含水率、蛋白質、脂質および灰分を分析した⁹⁾。分析値は、日本食品分析センターに依頼し2回測定した平均値で示した。

2.5 食材中のNaClの一次元拡散プロファイルの測定

予備加熱試料から直径3.6 cm、長さ5.0 cmの円柱を切り取り、薄いゴムカバーで覆い、所定の温度で3.00% (0.513 mol/kg)のNaCl溶液に浸漬した。各温度で一断面から2回の異なる時間で、例えば98°Cでは50分、60分NaClを拡散させた。円柱の軸方向のNaClの濃度プロファイルは、2.0 mm厚さのディスクを円柱からスライスし重量を測定した後、それぞれについてNaCl濃度を高感度塩分計(平沼産業, CLD-100)により測定した。このとき、食材中にもともと含まれる0.01 mol/kg程度の塩化物を差し引いて、濃度分布を測定した。集積した重量を円柱断面の表面からの距離に換算して、 C_t 対 $\eta (=x/2t^{1/2})$ のプロットをとり、NaClの濃度プロファイルを得た。

2.6 NaClのフィックの拡散係数Dの算出

各濃度でのフィックの拡散係数は、濃度プロファイルに

(4) 式(Matano の式)を適用して計算した。

$$D = -2 \frac{dC_t}{d\eta} \int_0^{\eta} \eta dC \quad (4)$$

濃度プロファイルに五次式を適用して、 C_t におけるプロファイルの傾きと、 C_t とプロファイルで囲まれた面積を算出し、それから D を計算した¹⁰⁾。

2.7 NaClの収着等温線の測定

所定の温度で収着等温線を得た。予備加熱試料中の拡散係数測定に供したのと同じ部分から直径 3.2 cm、厚さ 2.0 mm のディスクを切り出した。このディスクを所定濃度の NaCl の溶液に平衡に達するまで(約 2 時間)浸漬後、塩分計で NaCl の平衡収着を測定した。測定は 3 回繰り返した。

3. 結果および考察

3.1 じゃがいもおよび大根の SEM 写真

生および予備加熱した大根およびじゃがいもの断面のナチュラル SEM 写真を Fig. 2a-d に示す。生じゃがいもでは、細胞膜に包まれた細胞中に澱粉粒子が分散しているのに対して、予備加熱したじゃがいもでは、細胞膜は消失し、細胞内の基質が一つ一つゲル化している様子が観察される。一つ一つの細胞は、膨潤して約 1.3 倍の大きさになっている。

本研究では、このように澱粉が主成分である基質が糊化し、その中に液体水が分散した組織中を NaCl が拡散していくものとする。

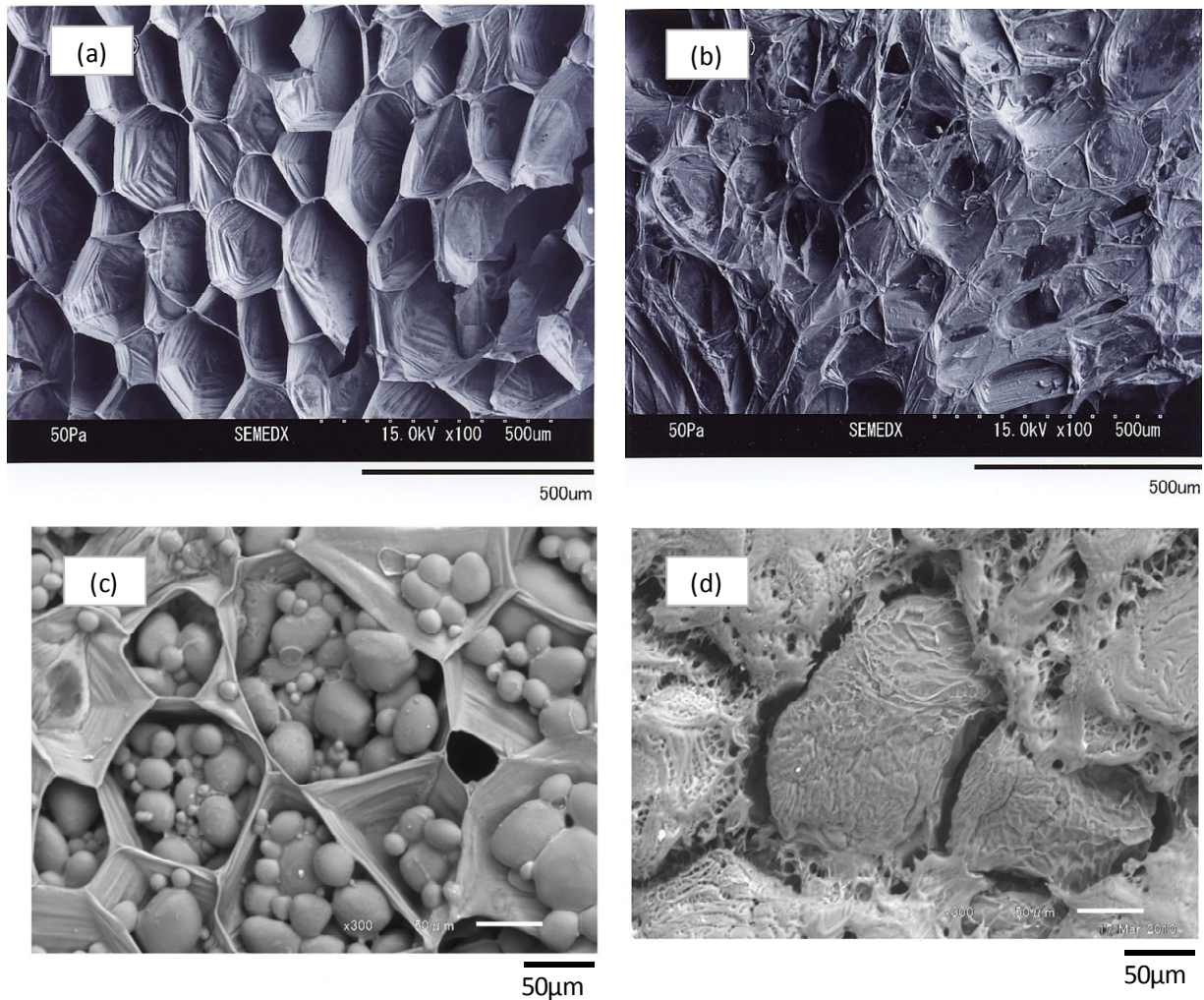


Fig. 2. Natural SEM photos of the cross section of Japanese radish and potato. (a) raw radish, (b) pre-cooked radish at 98°C for 2 hrs. Magnification at x100. (c) raw potato, (d) pre-cooked potato at 98°C for 40 min. Magnification at x300.

3. 2 じゃがいもの成分分析

生および予備加熱したじゃがいも(シンシア種)の成分分析値を、Table 1 に示す。これらの値は日本食品成分表の値とほぼ同じであった。予備加熱したものは生よりも、含水率がやや多くなり、その分、炭水化物の値はわずかに減少した。

3. 3 濃度プロファイルとDの変化

じゃがいも試料中に NaCl を一次元拡散させて得た濃度プロファイルを Fig. 3 に示す。さらにこの濃度プロファイルに Matano の式を適用して得たDの変化を Fig. 4 に示す。(3)式の D_p と D_L を、Fig. 4 に示す。 D_L 項の寄与は全濃

度範囲にわたって見られるけれども、測定された C_i の濃度範囲内で特徴的な極大を示すDの変化は、 D_L 項の寄与の結果であることが一目で理解できる。この濃度範囲を越えると D_p 項の寄与が大きくなり、0.1~0.2 mol/kgを越える濃度範囲で D_p 項の寄与は実質的になる。このようなDの変化は、大根、凝固卵白、豚肉でも見られたが⁴⁾⁵⁾⁶⁾、じゃがいもで特徴的なのは、30°Cおよび50°Cで D_p 項の寄与が殆ど無く、Dの変化は D_L 項のみの寄与によるものであることである。これは、30°Cおよび50°Cでは、じゃがいも中のNaClが非荷電領域中の拡散が極めて遅く、主として荷電領域中を拡散していくことを意味する。

Table 1. Components of potato

Potato	Moisture (g/100g)	Protein (g/100g)	Lipid (g/100g)	Ash (g/100g)	Carbohydrate (g/100g)
Raw	79.7	1.6	0.1	0.7	18.0
Precooked	80.5	1.6	0.1	0.7	17.1

Data was obtained by Japan Food Research Laboratories.

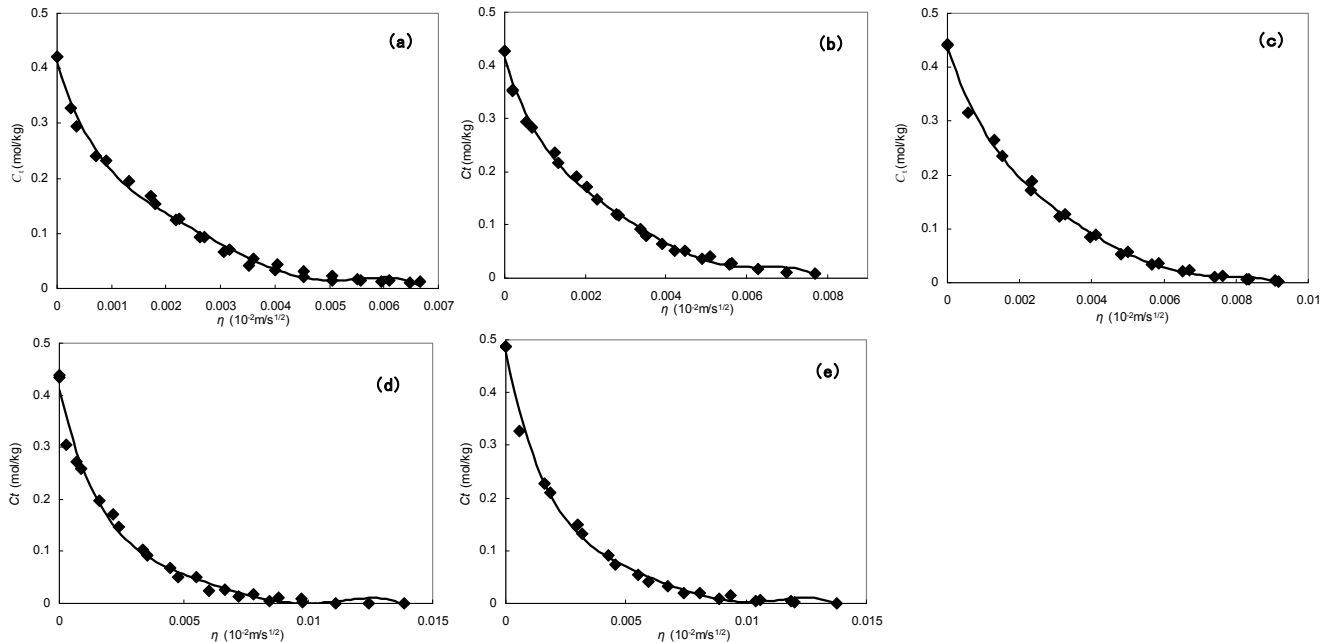


Fig. 3. Concentration profiles of NaCl in potato at (a) 30°C, (b) 50°C, (c) 60°C, (d)70°C, and (e) 98°C. —, line obtained by quantum approximation; ◆, (a) 30°C, experimental.

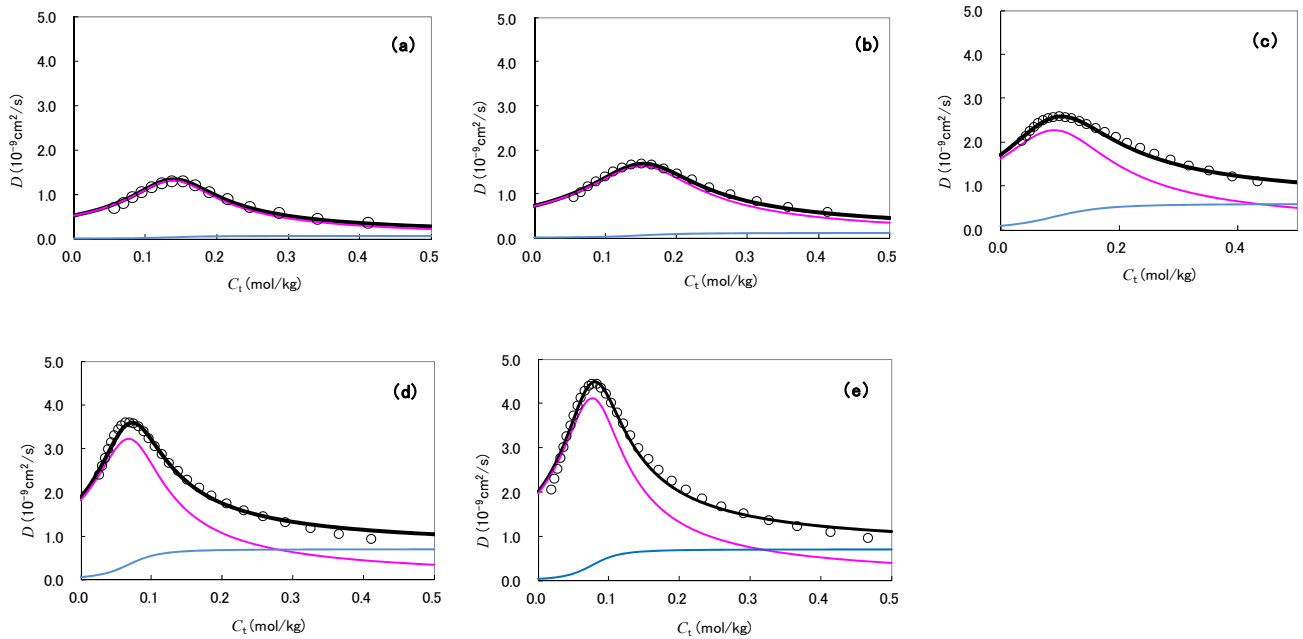


Fig. 4. Concentration dependences of NaCl in potato immersed at (a) 30°C, (b) 50°C, (c) 60°C, (d) 70°C, and (e) 98°C. ○, experimental; —, theoretical D ; —, theoretical D_p ; —, theoretical D_L .

Table 2. Parameters for dual mode diffusion of NaCl in potato and Japanese radish

Foodstuff	T (°C)	α	S_a (mol/kg)	K_a (kg/mol)	$D_T(p)$ ($10^{-9}m^2/s$)	$D_T(L)$ ($10^{-9}m^2/s$)
Potato	30	19.5	0.22	89	0.01	0.62
	50	18.3	0.16	114	0.11	0.76
	60	9.5	0.14	68	0.38	1.55
	70	10.7	0.08	143	0.60	2.00
	98	15.4	0.08	188	0.71	2.10
Japanese radish	98	9.0	0.06	2	0.80	3.00

3. 4 ジャガイモおよび大根中の NaCl の拡散のパラメータの比較

Fig. 4 に示す D の値と理論曲線が最小二乗法によりベストフィットするようにして、 α 、 S_a 、 K_a ($=\alpha/S_a = (K_L/K_p)$)、 $D_T(p)$ 、 $D_T(L)$ 値を得た。この値を Table 2 に示す。Table 2 には、参考のために、大根の値も載せた。Fig. 4 に示した D の変化を説明する4つのパラメータはそれぞれのジャガイモの状態に応じて、特徴的に変化する。浸漬温度の上昇とともに、 S_a の値は小さくなるが、これは温度の上昇ともなってペクチンなどの荷電基が溶出するためではないかと考えられる。温度とともに、 S_a の値が小さくなることによ

って、 α の値も小さくなった。また K_a の値は温度が高いと大きくなった。60°Cでのパラメータが他の温度での変化と異なる特異な傾向を示すのは、この温度付近でガラス転移が起こっているためではないかと考えられる。

3. 5 D_T の変化

浸漬温度に対する D_T の変化を Fig. 5 に示す。図に示すように、浸漬温度 50°C と 70°C の間で D_T は大きな変化が観察され、50-70°C 付近でガラス転移が起こっていると考えられる¹¹⁾。Liu はジャガイモ立方体による NaCl の収着の時間的変化から D_{app} を測定し、60°C まではフィックの拡散式で予測できるが、50°C では予測値より大幅に低下するこ

とを報告した¹²⁾。一方、じゃがいもの澱粉の糊化のピーク温度は 69~70°C、じゃがいもの澱粉の老化のピーク温度は 57°Cであることが報告されている¹³⁾。これらの温度は 50°Cよりも高いことから、ガラス転移はじゃがいも中の澱粉以外の成分、すなわち荷電基を持つ蛋白質によるものではないかと考えている。

さらに、基質の変化(相転移)が拡散係数 D_T の変化に反映されているということは、拡散の律速段階が液体水中の拡散ではなく、基質中の拡散であることを裏付ける証拠

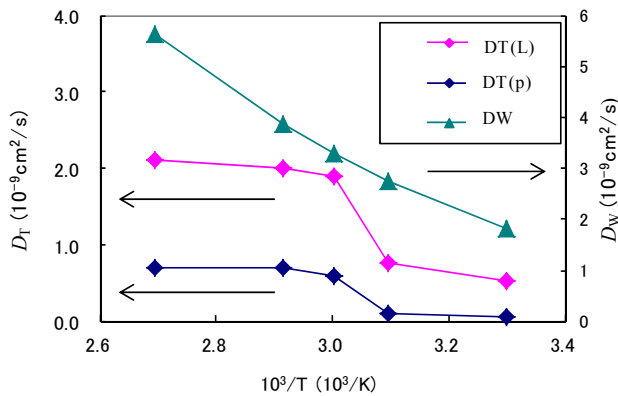


Fig. 5. The variations of D_T 's in potato and D_W with temperature

と考えられる。

2. 1節で述べたように、じゃがいもによるNaClの収着は、3つの組織によって起こる。まず、じゃがいも中の塩は基質に含まれる液体水に分配される。第二に、塩は p 型と L 型の二元機構で、水和基質相の水に収着される。これら3つの項に係わる(1)式は2つの項にまとめることができ、1つは $(1-\beta+\beta K_p')$ の係数を持つ C_s に比例する項と、もう1つは、L 型機構による収着である。4つの温度でのじゃがいもに対する収着等温線を **Fig. 6** に示す。実測値は C_i 対 C_s が極めて直線に近いが、わずかに上に凸の湾曲を持つ曲線であることを繰り返し測定により確認した。これらの実測値を再現する3つの成分をそれぞれの図中に示した。各成分は拡散挙動の解析から得た α と S_a を用いて、図中に示した β と K_p' を仮定して、描いたものである。このようにじゃがいも中でも他の3つの食材と同様に、拡散挙動では明確に現れた L 型収着の寄与が、液体水中への分配が大きいため、収着等温線では注意して評価しないと見過ごす程度にしか現れない。4つの食材すべての場合に、NaCl の拡散には二元性が顕著に現れ、収着にはそれは殆んど現れないことが、食材基質の特徴であると考えられる。ナイロン/酸性染料の場合のように含水率の少ない基質で、拡散と収着の両方に明白な二元性が現れたのとは

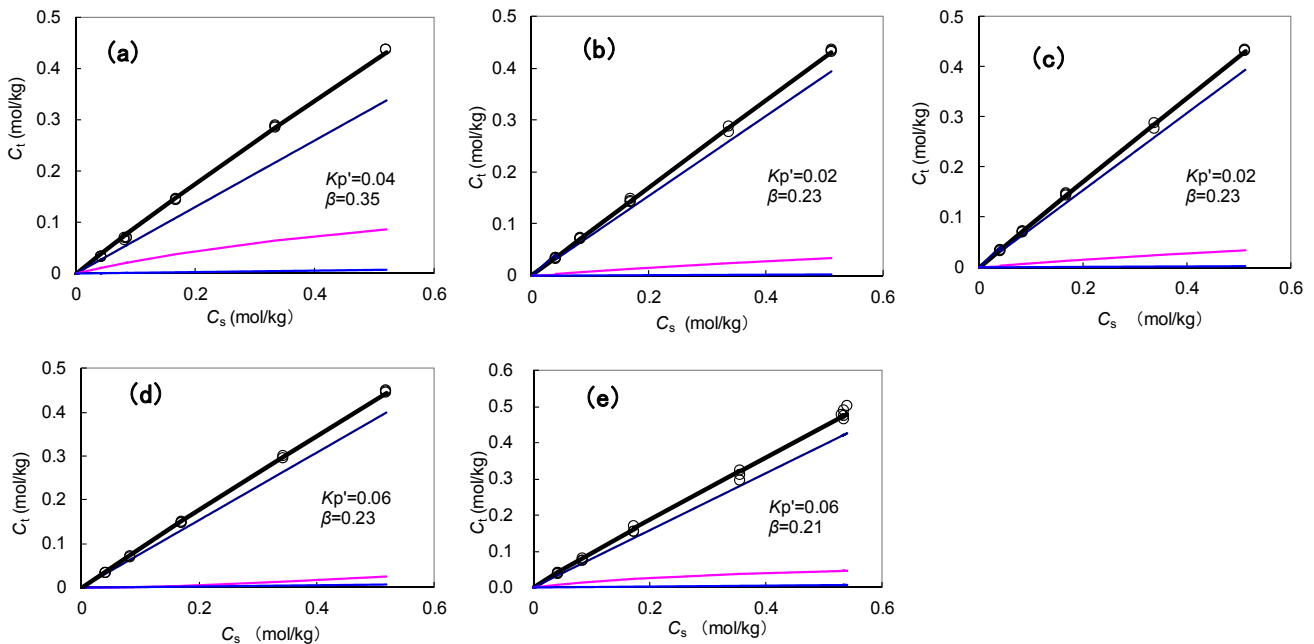


Fig. 6. Sorption isotherms of NaCl by potato immersed at (a) 30°C, (b) 50°C, (c) 60°C, (d) 70°C, and (e) 98°C. ○, experimental.; — calculated C_i ; —, $(1-\beta)C_s$; —, $K_L S_a C_s / (1 + K_L C_s)$; —, $K_p C_s$.

異なることに注意する必要がある。液体水と水和した基質からなる加熱したじゃがいもの構成は、NaCl のほとんど直線に見える収着等温線だけでは正しい理解は得られないが、拡散挙動には水で膨潤した基質部分の特徴が明白に現れたので、両者の理解を統一的行うことが出来た。

4. 結論

予備加熱したじゃがいもを 3.00% NaCl 溶液に一次元拡散させる条件のもとで、30~98°Cのいずれの温度でも D はある特定の濃度で極大を示した。この結果を二元収着拡散理論で解析し、4つのパラメータを得た。得られた $D_T(L)$ と $D_T(p)$ 値は 50°Cと 70°Cの間で急激に増加したが、これは含水基質のガラス転移が起こったためと考えた。またこのような $D_T(L)$ と $D_T(p)$ 値の増大が基質の変化に対応していることから、NaCl の拡散の律速段階が水和した基質中の拡散であると結論した。

一方わずかに上に凸の収着等温線は、液体水相と水和基質相を仮定し、二元収着拡散理論で再現することが出来た。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、ご理解を賜り助成いただきました公益財団法人ソルト・サイエンス研究財団に厚くお礼申し上げます。

また Fig. 2 の電子顕微鏡写真は日本電子(株)の御厚意で撮影していただきました。厚くお礼申し上げます。

文献

- 1) Guiheneuf, T. M., Gibbs, S. J., & Hall, L. D. (1997). Measurement of the inter-diffusion of sodium ions during pork brining by one-dimensional ^{23}Na magnetic resonance imaging (MRI). *J. Food Eng.*, **31**, 457-471.
- 2) Pajonk, A. S., Suarel, R., & Andrieu, J. (2003). Experimental study and modeling of effective NaCl diffusion coefficients values during Emmental cheese brining. *J. Food Eng.*, **60**, 307-313.
- 3) 小見山二郎, 橋場浩子, 牛腸ヒロミ, 仲西正(2004). 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**(4), 404-412.
- 4) Hashiba, H., Komiyama, J., Nakanishi, T., & Gocho, H. (2007). Dual mode diffusion of NaCl in Japanese radish under cooking conditions. *J. Food Sci.*, **72**(3), C154-C162.
- 5) Hashiba, H., Gocho, H., & Komiyama, J. (2008). Dual mode diffusion and sorption of sodium chloride in pre-cooked egg white. *LWT-Food Sci. Tech.*, **41**(10), 1978-1986.
- 6) Hashiba, H., Gocho, H., & Komiyama, J. (2009). Dual mode diffusion and sorption of sodium chloride in pork meats under cooking conditions. *LWT-Food Sci. Tech.*, **42**(6), 1153-1163.
- 7) Komiyama, J., & Iijima, T. (1974). Diffusion of monoanionic dyes in Nylon. *J. Polym. Sci., Polymer Physics Edition*, **12** (8), 1465-1476.
- 8) Robinson, R. A., & Stokes, R. H. (1959). *Electrolyte Solutions* (Footnote of Table 11.1) (p.289) and (Appendix 6.2)(p.465). New York: Academic Press.
- 9) 科学技術庁資源調査会編(1998). 四訂日本食品標準成分表.
- 10) Matano, C. (1932). On the relation between the diffusion-coefficients and concentrations of solid metals. (The nickel-copper system). *Jpn. J. Phys.*, **8**, 109-113.
- 11) J.M.V. Blanshard & P. J. Lillford. (1993). *The glassy state in foods*. p.24. Nottingham University Press.
- 12) Liu H. (1992). A kinetic study of salt diffusion into potato at high temperature. *International Journal of Food Science and Technology*, **27**, 443-455.
- 13) Karlsson, M. E., & Eliasson, A. (2003). Gelatinization and retrogradation of potato (*Solanum tuberosum*) starch in situ as assessed by differential scanning calorimetry. (DSC). *LWT-Food Sci. Tech.*, **36**(10), 735-741.

Dual Mode Diffusion and Sorption of NaCl in a Carbohydrate Foodstuff, Potato

Hiroko Hashiba ¹, and Hiromi Gocho ²

¹Department of Registered Dietitian, Faculty of Health and Nutrition, Tokyo Seiei College,

²Department of Human Life Science, Faculty of Human Environmental Sciences, Jissen Women's University

Summary

This study aims to obtain insight into the mechanism of NaCl diffusion in soggy potato. It has been generally presumed that NaCl in foodstuffs diffuses with a constant Fick's diffusion coefficient, D , through liquid water channel imbibed in them. However, the present study reports that D 's for the potato, measured at 30-98°C exhibit maximum showing variations with total concentration, C_t , of NaCl in potato. The same kind of dependences of C_t have been found by us for Japanese radish, solidified egg white and pork meats. These variations were consistently interpreted in terms of a dual mode diffusion and sorption theory, comprising two thermodynamic diffusion coefficients, $D_T(p)$ and $D_T(L)$, for p and L regions in the water swollen potato substrate. These two D_T 's showed remarkable rises in the same temperature range, 50-70°C, which were ascribed to the "glass transition" in the substrate. Experimentally obtained sorption isotherms, which were slightly convex upward in the low C_t range, were satisfactorily reproduced with the dual parameters and the fractions of water swollen substrate in the whole potato. Throughout the observations on the NaCl diffusion in the four foodstuffs, we concluded that the diffusion mechanism of NaCl in the four foodstuffs is unifiedly represented by the dual mode diffusion and sorption theory.