

## 9261 食品中における食塩の拡散

助成研究者:小竹佐知子(山梨県立女子短期大学 生活科学科)

## 《目的》

実際の調理過程の中で粘性のある調味液で食品を調味する場合、食品への味しみが悪いことは一般に知られているが、これまでに粘性溶液からの食品への拡散係数を系統的に把握した実験は行われていない。そこで、粘性溶液における調味機構を把握することを目的として、粘性溶液に各種でんぷんを用い、モデル食品中の食塩の拡散係数を算出し、拡散係数と調味料水溶液の粘度の関係についての検討を行った。

## 《方法》

馬鈴薯でんぷん、コーンスターチを1時間水浸漬した後、3~5%濃度となるように加熱糊化させ、これに食塩を0.1Mの濃度になるように調製したものを粘性溶液とした。モデル食品には2%濃度の寒天ゲルを用い、一辺の長さが1~5cmの立方体に調製した。寒天ゲルを粘性溶液に浸漬し、0~48時間経時的に取り出して、ゲル中の食塩および水分含量を測定した。食塩含量は、取り出したゲルをホモジナイズ後適宜定容し、遠心分離にかけた上澄みをチオシアン酸水銀法により測定した。求めた食塩含量および水分含量の値からゲル中の水分に含まれる食塩平均濃度を算出し、立方体における拡散方程式の解に代入して、コンピューターによるベストフィット法により食塩の拡散係数を算出した。

## 《結果》

2%寒天ゲル中における食塩の拡散係数値 ( $0.99 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、0.1M食塩水溶液に2%寒天ゲルを浸漬したもの) と本実験で得られる拡散係数値との比較検討を行った結果、粘性調味料水溶液の粘度が増加すると、寒天ゲル中での拡散係数が減少することが認められた。同じでんぷん濃度においては、コーンスターチに比べ馬鈴薯でんぷんにおける拡散係数値の方が小さかった。レオログラフゾルおよびE型粘度計により粘性調味料水溶液の物性値を測定した。その中でE型粘度計を用いて高いずり速度を与えたときの見かけの粘度は拡散係数との間により相関を有し、拡散係数予測に有用であることが認められた。



## 9261 食品中における食塩の拡散

助成研究者:小竹佐知子(山梨県立女子短期大学 生活科学科)

## 1. 研究目的

塩は調味の基本と言われ、塩あじを上手にコントロールすることが食品の仕上がりに大きく影響する。したがって、目的の味つけにはどの程度の時間調味すれば良いのかという指標を作ることが重要である。食品の調味過程には調味料の食品中での拡散、食品への吸着および付着など様々な物理化学的現象が同時に生じているが、中でも食品中での調味料の拡散が占める割合は大きく、拡散現象を定量的に扱うには拡散係数を把握することが重要となってくる。

実際の調理過程を見ると、調味操作は加熱中に行われることが多く、しかも調味液は複雑な組成からなる粘性溶液であったり、懸濁液であったりする。また、一般に粘性のある調味液で食品を調味する場合、食品への味しみが悪いことは知られているが、これまでに粘性溶液からの食品への拡散係数を系統的に把握した実験は行われていない。

そこで、粘性溶液における調味機構を把握することを目的として、粘性溶液にでんぷんのり水溶液を用い、モデル食品(寒天ゲル)中の食塩の拡散係数を算出して、拡散係数と調味料水溶液の粘度の関係についての検討を行った。

## 2. 研究方法

## 2.1 粘性調味料水溶液および寒天ゲルの調製

## 2.1.1 粘性調味料水溶液の調製方法

粘性調味料水溶液は、調味料に食塩を用い、粘性を付与するための増粘剤にはコーンスターチおよび馬鈴薯でんぷんを用いた。食塩濃度は、食塩-でんぷん-水系の全水分に対して0.1Mとなるように調製し、でんぷん濃度は3%および5%とした。

コーンスターチあるいは馬鈴薯でんぷんを脱イオン水に60分浸漬して膨潤させた後、所定量の食塩をあらかじめ脱イオン水に溶解させておき、これを加熱直前にでんぷん膨潤液に混合した。ホモミキサー(井内盛栄堂製)で、60rpmで攪拌して、2℃/minで昇温させながら加熱し、微沸騰継続20分後に消火した。いずれの粘性溶液も25℃恒温槽に24時間放置後に実験に供した。

## 2.1.2 寒天ゲル調製方法

寒天(関東化学 試薬)ゲル濃度は2%の濃度とした。粉末寒天を脱イオン水に30分浸漬膨潤させた後、50rpmで攪拌して、2℃/minで昇温させながら加熱し、微沸騰継続15分後に消火した。ステンレス製のパットに流し込んで成形し、25℃恒温槽に24時間放置後に実験に供した。粘性調味料水溶液浸漬直前に一辺の長さ1、3および5cmの立方体に切断した。

## 2.2 粘性調味料水溶液の物性測定

粘性調味料水溶液の見かけの粘度は、東機産業株式会社製のEHD型回転粘度計を用いて測定した。測定温度は25℃とし、ロータには、1°34'コーンを用いた。粘性調味料水溶液を1.2mlシリンジで測り取り、コーンおよびプレート間に充填し、試料温度を安定させるために5分間放置後に測定を開始した。ロータ回転数は0.5rpm~100rpmにおける8段階とし、各回転数における試料のずり速度を、回転1分後に測定した。

粘性調味料水溶液の動的粘弾性は、株式会社東洋精機製作所のレオログラフゾルを用いて測定した。測定温度は25℃とし、粘性調味料水溶液1.5mlを付属セル内に充填し、測定は試料温度を安定させるために5分間放置後から開始した。測定は、15秒おきに2分間行った。

## 2.3 寒天ゲル中食塩平均濃度測定および拡散係数算出方法

### 2.3.1 寒天ゲル中食塩平均濃度測定方法

寒天ゲルは、浸漬中濃度変化を無視できる充分量の粘性調味料水溶液に0~48時間浸漬した。粘性調味料水溶液はスターラーで攪拌し(120rpm)、実験は25℃恒温槽内で行った。なお、恒温槽は自動温度調節器により設定温度25±0.1℃にコントロールした。浸漬は3回繰り返して行った。

所定時間浸漬後、寒天ゲルを取り出し、半数の試料を用いてゲル中の水分含量を減圧乾燥法により測定した。また、残りの半数の試料はホモジナイズ後適宜定容し、遠心分離後の上澄みをチオシアン酸水銀法により測定し、ゲル中に移動した食塩量を求めて、ゲル中の食塩平均濃度  $\bar{c}(t)$  を算出した。

### 2.3.2 拡散係数算出方法

境界条件 [1] および初期条件 [2] に関する拡散方程式の立方体における平均濃度についての解を [3] に示した<sup>1)</sup>。

$$\text{境界条件: } C(x, y, z, t) = C_1, \quad x = \pm L, y = \pm L, z = \pm L, \quad t > 0 \quad [1]$$

$$\text{初期条件: } C(x, y, z, t) = C_0, \quad -L < x < L, -L < y < L, -L < z < L, \quad t = 0 \quad [2]$$

$$\frac{C_1 - C(t)}{C_1 - C_0} = 8 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{1}{(m+1/2)^2 (n+1/2)^2 (p+1/2)^2 \pi^6} \\ \times \exp \left[ - \{ (m+1/2)^2 + (n+1/2)^2 + (p+1/2)^2 \} \pi^2 D t / L^2 \right] \quad [3]$$

ここで、 $\bar{C}(t)$ は試料中の食塩平均濃度、 $C_1$ および $C_0$ はそれぞれ境界濃度および初期濃度、 $t$ は浸漬時間、 $L$ は立方体の一辺 $l/2$ の長さ、 $D$ は拡散係数、 $m, n$ および $p$ は無級数の項数  $(1, 2, 3, \dots)$  である。

そこで、立方体における拡散方程式の解[3]に実験により求めた  $\bar{C}(t)$ 、 $t$  および  $L$  の値を代入し、級数和 $m, n, p$ を0~100まで用いたときの拡散係数 $D$ をベストフィット法により算出した。

### 3. 研究結果

#### 3.1 食塩平均濃度の経時変化

3%コーンスターチ-食塩水溶液に浸漬した2%寒天ゲル中の食塩平均濃度の経時変化をFig.1に示した。当然のことながら、立方体の大きさが大きくなるほど、食塩濃度

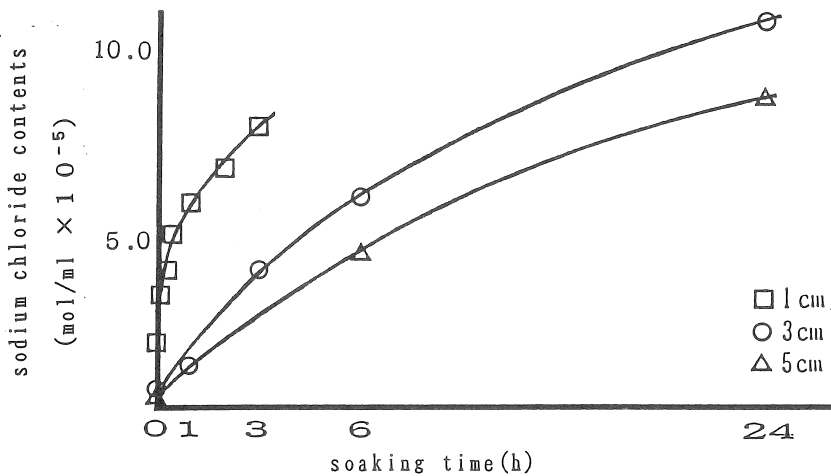


Fig.1 Changes of the sodium chloride contents in agar gel cubes after soaking in sodium chloride - 3% corn starch solutions.

が平衡になるまでの時間が長くなっていった。5%コーンスターチあるいは、3%および5%馬鈴薯でんぷんの場合も同様の結果であった。

次に、コーンスターチの濃度が異なる場合の寒天ゲル中の食塩平均濃度の経時変化を、一辺の長さが1cmの立方体の場合についてFig.2に示した。でんぷん濃度が高くなるにしたがって、食塩の移動の遅くなっていることが認められた。馬鈴薯でんぷんにおいても、また、他の大きさの立方体の場合においても同様の結果であった。

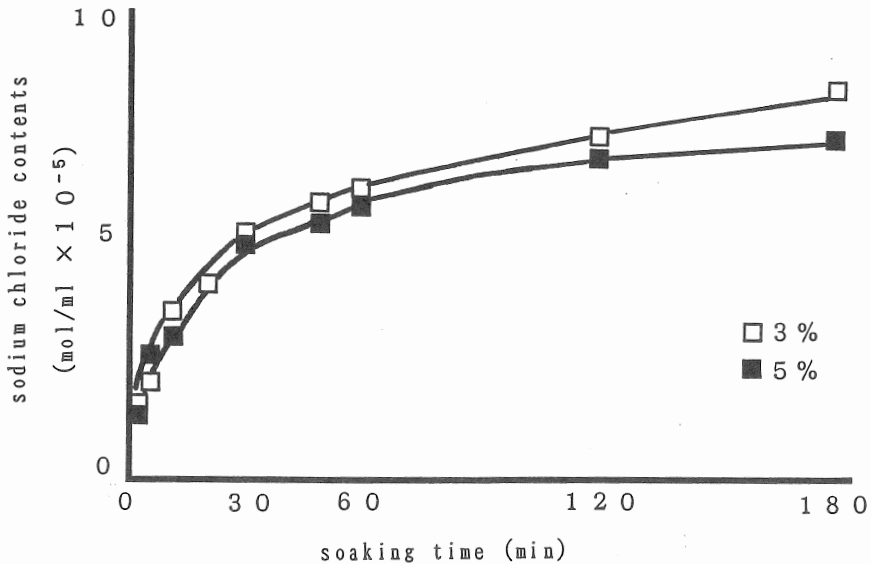


Fig.2 Changes of the sodium chloride contents in agar gel cubes with 1cm side length after soaking in sodium chloride - corn starch solutions.

### 3.2 拡散過程における無次元濃度および無次元時間の関係

粘性調味料水溶液に浸漬した2%寒天ゲル中の食塩の拡散における、無次元濃度  $(\bar{C}(t)/C_1)$  および無次元時間  $(t/L^2)$  の関係を3%コーンスターチの場合について、Fig.3に示した。無次元濃度が、立方体の大きさにはよらず無次元時間により表されることが認められた。このことは、他の試料においても確認できた。以上のことから、各でんぷんの各濃度における拡散係数の算出が可能であることが認められた。

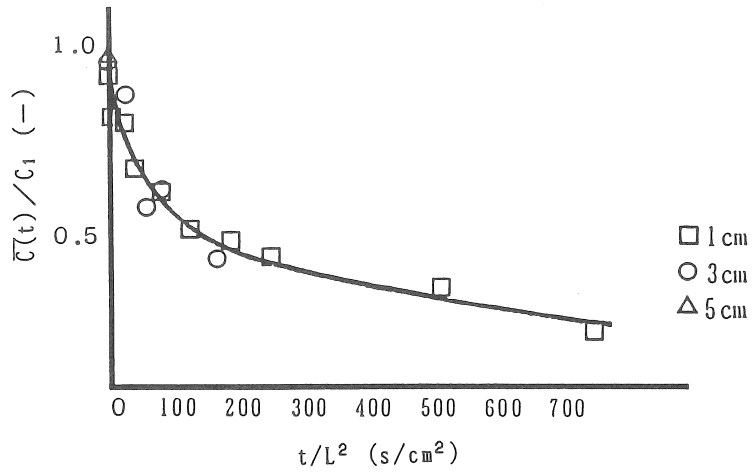


Fig.3 The relationship between  $\bar{C}(t)/C_1$  and  $t/L^2$  on 2% agar gel cubes after soaking in sodium chloride - 3% corn starch solutions.

3.3 粘性溶液から調味した際の寒天ゲル中の食塩の拡散係数

3.2に示した無次元濃度および無次元時間を用いて、拡散方程式の解[3]より求めた拡散係数の結果をTable 1に示した。拡散係数は、粘性調味料水溶液の粘度が上昇するにしたがって減少した。また、同じでんぷん濃度においては、コーンスターチに比べ、馬鈴薯でんぷんにおける拡散係数の方が小さな値であった。

Table 1 Diffusion coefficients of sodium chloride in 2% agar gel cubes after soaking in sodium chloride - starch solutions.

starch concentration (%)	corn starch ( $\times 10^{-6}$ cm <sup>2</sup> /s)	potato starch (cm <sup>2</sup> /s)
0 <sup>2)</sup>	9.9 <sup>2)</sup>	9.9 <sup>2)</sup>
3	4.4	2.6
5	3.1	2.3

3.4 粘性調味料水溶液の物性

3.4.1 E型粘度計測定結果

3%および5%のコーンスターチ、馬鈴薯でんぷんをE型粘度計により測定した結果、いずれの試料もずり速度が増加するにともない、見かけの粘性率が減少する擬塑性流動<sup>3)</sup>であることが認められた。ずり速度および見かけの粘性率の関係をFig.4に示した。

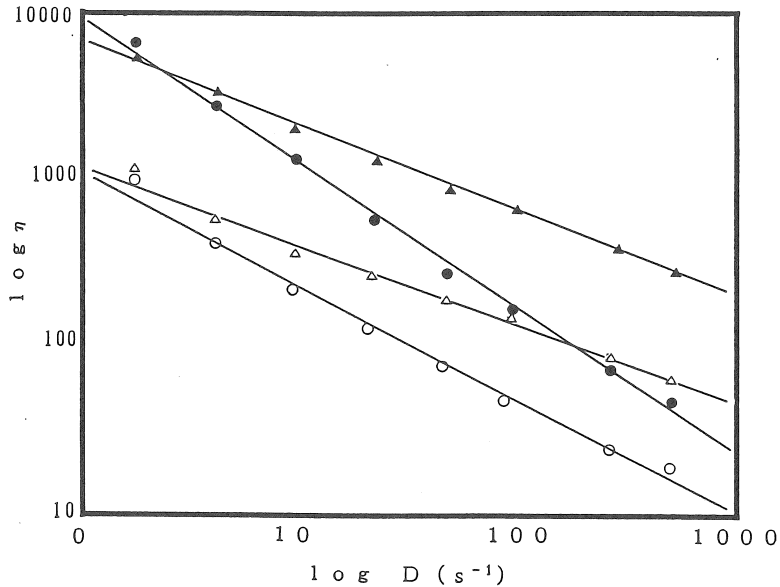


Fig.4 The relationship between  $\eta$  and share rate.

○3% corn starch, ●5% corn starch, △3% potato starch, ▲5% potato starch

以上の結果より求めた、0.1Mの食塩を含む3%および5%のコーンスターチ、馬鈴薯でんぷんの見かけの粘度および粘性係数をTable 2にまとめた。見かけの粘度はコーン

Table 2 Apparent viscosity and non-Newtonian viscosity index of 0.1M sodium chloride - starch solutions.

	starch concentration			
	3 %		5 %	
	$\eta_{app}$	$n$	$\eta_{app}$	$n$
corn starch	1.37	0.315	11.00	0.119
potato starch	1.43	0.528	6.88	0.477



スターチ、馬鈴薯でんぷんともに、でんぷん濃度増加により増加した。でんぷんの種類による見かけの粘度の違いを見ると、3%濃度では両でんぷんにおける値がほとんど同じであるのに対し、5%濃度になると、コーンスターチの値の方が、馬鈴薯でんぷんに比べ2倍の大きさであった。粘性係数は、両でんぷんともでんぷん濃度が増加するにしたがい減少し、減少の程度はコーンスターチの方が大きかった。また、粘性係数はいずれの濃度においても、馬鈴薯でんぷんにおける値の方がコーンスターチに比べて大きかった。

### 3.4.2 レオログラフゾル測定結果

粘性調味料水溶液の動的粘弾性測定では、測定開始後15秒おきに2分間、動的弾性率（ $G'$ ）および動的損失（ $G''$ ）を測定したが、測定中両値にはほとんど変化がみられなかったため、測定開始2分後の結果をTable 3に示した。動的弾性率、動的損失ともにでんぷん濃度が増加するにしたがって、増加した。動的弾性率および動的損失の比である損失正接（ $\tan \delta$ ）は、でんぷん濃度増加にともない、コーンスターチでは増加し、馬鈴薯でんぷんでは減少した。

Table 3 Storage modulus and loss modulus of 0.1M sodium chloride  
-starch solutions.

		starch concentration	
		3 %	5 %
corn starch	$G'$	1.7	2.3
	$G''$	1.0	1.3
	$\tan \delta$	0.59	0.65
potato starch	$G'$	0.5	2.4
	$G''$	0.4	1.7
	$\tan \delta$	0.8	0.71

### 3.5 粘性調味料水溶液の物性値と拡散係数の関係

3%および5%コーンスターチおよび馬鈴薯でんぷんを用いた粘性調味料水溶液から調味した際の拡散係数と粘性調味料水溶液の物性値との関係を見ることを試みた。レオログラフゾルにより測定した動的弾性率、動的損失および損失正接の値は、いずれも拡散係数の結果と有意な相関は認められなかった。E型粘度計により測定した見

かけの粘度の中で、拡散係数と最もよい相関を示したのは、ずり速度 $384s^{-1}$ の際の見かけの粘度の値の逆数であった。相関係数は、0.993であった。

#### 4 考 察

3%および5%のコーンスターチおよび馬鈴薯でんぷんで粘度をつけた食塩水溶液を調味料水溶液として、2%寒天ゲル中への食塩の拡散係数を算出した結果、でんぷんの濃度が増加して粘度が高くなるにしたがって、拡散係数は減少した。拡散係数の粘度による違いを、レオログラフゾルあるいはE型粘度計による測定値によって表した結果、E型粘度計測定の高いずり速度を与えた際の見かけの粘度がよく拡散係数の値を表すことが認められた。一般に拡散係数と粘度との間には、

$$D = RT / 6 \pi r N_A \eta \quad [4]$$

の関係がある。ここで、Dは拡散係数、Rは気体定数、Tは絶対温度、rは拡散分子の半径、 $N_A$ はアボガドロ数、 $\eta$ は粘度である。しかしながらこの関係式は、拡散する分子が球形で、Stokes則に従うことが条件となっている。本研究で用いたでんぷん水溶液は、ニュートン流体ではなく、本関係式の適用は不可能である。そこで、拡散係数の予測についての指標として、高いずり速度を与えた際の見かけの粘度を用いることが可能であることを確認した。

#### 5 今後の課題

粘度のある調味液からの調味は、カレー、シチューなどの煮込みの場合があげられる。一般的な調理方法をまとめると、Table 4のような結果であった。個々のメニューの材料配合は異なっているが、粘性のある調理品の小麦粉でんぷんは、1.5~5%であることが認められた。本実験においては、でんぷんスケールの両端にあるコーンス

Table 4 Ingredients of viscosity solution on curry and stew.

food	flour (g)	water/soup (ml)	concentration of flour (%)
curry <sup>5)</sup>	10	200 (water)	5
curry <sup>6)</sup>	40	800 (bouillon)	5
curry <sup>7)</sup>	50	1600 (water)	3
stew <sup>8)</sup>	3	200 (water)	1.5
stew <sup>9)</sup>	18	1200 (bouillon)	1.5
stew <sup>7)</sup>	40	1000 (water)	4

ターチおよび馬鈴薯でんぷんを用い、モデル食品における結果を示した。実際の調理過程における小麦粉を用いた場合あるいは、実際の食品を用いた場合の検討をすることが課題とした残った。

#### 引用文献

- 1) Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N. (1960) : 『Transport Phenomena』 (Wiley International Edition), p.373
- 2) Odake, S. et al (1990) : "Apparent Diffusion Coefficient of Sodium Chloride in Cubical Agar Gel", Agric. Biol. Chem., 54, 2811-2817
- 3) 赤羽ひろ, 中浜信子 (1989) : "調理におけるレオロジー測定", 調理科学, 22, 247-259
- 4) 野田春彦 『物理化学』 東京化学同人, p.313
- 5) 島田キミ江, 山崎清子 『調理と理論 第2版』 同文書院, p.43
- 6) 高木節子, 加田静子 『調理 -基礎と応用-』 朝倉書店, p.126
- 7) 山本美枝子ら 『調理』 弘学出版株式会社, p.176, 162
- 8) 寺元芳子, 下村道子 『新調理』 同文書院, p.100
- 9) 荒川幸香ら 『調理の理論と手法』 株式会社科学同人, p.89

The Diffusion of Sodium Chloride in Foods

-The Diffusion of Sodium Chloride from viscosity solutions-

Sachiko ODAKE  
Yamanashi Women's Junior College, Living Science

Summary

The relationship between the diffusion coefficients of sodium chloride and viscosity of solutions mixed with starch was studied. Sodium chloride - starch mixed solutions were prepared as the concentration of sodium chloride was 0.1M and the starch were 3% and 5%. The size of agar gel cubes were 1, 3 and 5cm (2L) and the concentration of agar gel was 2%. After soaking in a sodium chloride - starch mixed solutions for 0 - 48 hours ( $t$ ), the mean concentrations ( $\bar{C}(t)$ ) of sodium chloride in gel cubes were measured. The value for the diffusion coefficient, which was yielded by substituting the values of  $t/L^2$  and  $\bar{C}(t)$  into the solution of the diffusion equation, depends on the viscosity of the seasoning solutions. The diffusion coefficients of sodium chloride in 2% agar gel cubes from viscosity solutions were described as a function of the apparent viscosity at the high share rate.