研 究 ノ ー ト

ダイコンおよびニンジン薄片の 蒸煮速度式に関する研究

久保田 清*・高崎かほる*・
藤本真紀子*・鈴木 寛一*・
保坂 秀明*

A Study on the Cooking-rate Equations of Radish and Carrot Slices

KIYOSHI KUBOTA*, KAHORU TAKASAKI*, MAKIKO
FUJIMOTO*, KANICHI SUZUKI and HIDEAKI HOSAKA

In order to design various cooking apparatuses, it is necessary to measure cooking rates and establish a rate equation of cooking which is used easily. The impact-penetration method was used for measuring the cooking rates, and the following cooking-rate equations were obtained for the cooking of radish and carrot slices.

For radish slice:

$$dx/d\theta = 6.43 \times 10^{17} \exp(-3.05 \times 10^4 / R_g T) \\ (1-x)^{2.5} (x+0.02) \quad (\text{min}^{-1})$$

For carrot slice:

$$dx/d\theta = 1.69 \times 10^{18} \exp(-3.22 \times 10^4 / R_g T) \\ (1-x)^{1.5} \quad (\text{min}^{-1})$$

where $x(-)$ is the cooking ratio, $\theta(\text{min})$ the cooking time, $T(^{\circ}\text{K})$ the cooking temperature and $R_g = 1.987 \text{ cal/g} \cdot \text{mol} \cdot ^{\circ}\text{K}$ the gas-constant.

(Received Jun. 20, 1979)

生米など低含水率食品に対しては、蒸煮程度の測定が、含水率変化を測定することによって容易にできるため、蒸煮速度を簡単に求めることができた。しかし高含水率食品では蒸煮程度を測定するために、レオロジー的な物性変化を測定することが必要となってくる。これまでに、高含水率食品であるジャガイモとサツマイモの蒸煮実験を行い、煮えた程度を、箸を突き刺して、その際のやわらかさにより判別するというに基づいて、簡

単な衝撃貫通試験装置を作製し、蒸煮速度を求める研究を行ってきた^{1,2)}。

本報は、これまでのイモ類と性質を異にしている根菜類食品であるダイコンとニンジンについて蒸煮速度の測定を行った結果についての報告である。

1. 実験方法

(1) 試料

市販のダイコン(含水率 90%)とニンジン(含水率 93%)をスライサーで厚さ 3.0 mm に輪切りにした薄片を、30°C 水浴中に 1~3 時間浸漬したものを試料として使用した。

(2) 蒸煮実験

薄片にした試料をステンレス製の籠(20 メッシュ)に入れ、恒温槽中で所定温度、所定時間蒸煮した。蒸煮した試料は、蒸煮を速やかに停止させるため、30°C 水浴中に 1 分間浸漬した。表面には付着している水分を、ろ紙を用いて軽く押さえるようにして拭き取り、蒸煮速度の測定に供した。

(3) 蒸煮速度の測定

前報^{1,2)}で使用した同じ衝撃貫通試験装置を用いて蒸煮速度の測定を行った。装置の概要を Fig. 1 に示す。この装置は、円管(内径 6 mm)内を、円柱状の貫通棒(直径 4 mm)を、所定の高さから重力によって自然落下させ、試料を衝撃貫通させるに要するエネルギーを求めるたいへん簡便な装置である。前報^{1,2)}の研究によると、重さ 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30 g の貫通棒を用意し、落下高さ 5~15 cm 程度で衝撃貫通が起こるように、適当な重さの貫通棒を選定して測定するのがよいということがわかっている。この落下高さ範囲内では、重さの異なる貫通棒を用いても、貫通棒の重さと落下高さの積がよく一致する結果が得られるが、この範囲より高くなると、円管の内壁に貫通棒が落下中接触を起こしたり、逆に低くなると、精度が悪くなったりして、信頼できるデータが得られなくなってくるので注意を要する。

貫通棒は、前報^{1,2)}の研究において再現性のよい結果が得られた直径 4 mm のものを使用した。貫通棒の直径が、これより小さくなると、試料の組織が部分によって

* 広島大学生物生産学部生物生産学科 (〒 720 福山市緑町 2-17)

Department of Applied Biological Science, Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University, Fukuyama-shi, Hiroshima-ken

Fig. 1. Impact-penetration tester

(1) cylinder (2) plunger (3) stopper
(4) sample holder (5) sample

均一でないことによるばらつきを生じたり、逆に大きくなると、大きな試料が得られないときに反復実験が行いにくくなるなどの欠点がある。貫通棒の落下高さは、2 cm 刻みに変えられるようにしているが、反復実験を5回行って3~4回が同じ落下高さで衝撃貫通をする。本試験法は、単純で再現性がよく、基準試験法として採用されてもよいと思われるような特徴をもっている。

貫通棒を自由落下させた場合の試料の単位面積あたりに与えられる衝撃貫通エネルギー E [erg/cm²] は、次式で表わされる。

$$E = mgh/a \quad (1)$$

ただし、 m および a : 貫通棒の質量 [g] と断面積 [cm²]、 h : 貫通棒の落下高さ [cm]、 g : 重力の加速度 [cm/sec²] である。

貫通棒の断面積 a と重力の加速度 g を一定として実験を行っているため、衝撃貫通エネルギー項の中の貫通棒の質量と高さの積 $K = mh$ [g·cm] を、衝撃貫通試験の質量・頭と定義し、この値の変化を求めることによって

蒸煮速度の測定を行なった。

2. 実験結果および考察

ダイコンおよびニンジン薄片の蒸煮実験を、温度範囲 80~99.5°C において、蒸煮時間 θ [min] をいろいろ変えて行い、得られた衝撃貫通試験の質量・頭 K 対蒸煮時間 θ の関係を Fig. 2 および Fig. 3 に示す。

ダイコンでは、蒸煮曲線が S 字型を、また、ニンジンでは、単調なべき乗型の曲線を示している。前報^{1,2)} で用いたデンプン質系の根菜類食品であるジャガイモとサツマイモでは、いずれも同じ S 字型の蒸煮曲線を示したが、本実験で用いた繊維質系の根菜類食品であるダイコンとニンジンでは、両者の蒸煮曲線の形状が著しく異なっている。

Fig. 2 および 3 において、 K の値が平衡値に達することから、蒸煮率 x [-] を次式で定義する。

$$x = (K_0 - K) / (K_0 - K_e) \quad (2)$$

ただし、添字 0 および e は、それぞれ初期および平衡状態を示す。ダイコンにおいて、蒸煮時間が 3 分以内のと

Fig. 2. Relation between the impact-penetrating mass-head K and the cooking time θ on the cooking radish slices Fig. 3. Relation between the impact-penetrating mass-head K and the cooking time θ on the cooking carrot slices

Fig. 4. Relation between the cooking ratio x and the cooking time θ on the cooking radish slices

Fig. 5. Relation between the cooking ratio x and the cooking time θ on the cooking carrot slices

ここで、 x の値が負になる点があるが、簡易化のためゼロとして取り扱った。ダイコンとニンジン薄片の蒸煮実験の結果を、蒸煮率 x 対蒸煮時間 θ の関係として示したのが Fig. 4 および 5 である。曲線は、後で述べる計算値である。

3. 蒸煮速度式の設定と考察

食品の蒸煮は、成分的に多種多様であり、形態が複雑なものが多いため、いろいろな物理的、化学的变化を伴う複雑な現象である。蒸煮機構が複雑で解明できない場合には、総括的とはなるが、次に示す簡単な経験的汎用速度式^{3,4)}が、当面する工業的目的に対して有用と考えられる。

単調なべき乗型曲線の場合：

$$dx/d\theta = k_n(1-x)^n \quad (3)$$

S 字型曲線の場合：

$$dx/d\theta = k_{n,\alpha}(1-x)^n(x+\alpha) \quad (4)$$

ここで、 k_n [min^{-1}], $k_{n,\alpha}$ [min^{-1}], n [—] および α [—] が、実験データから求めることになる速度パラメータである。ダイコンに対しては、式(4)が、また、ニンジンに対しては、式(3)が、それぞれ適用できる。

Fig. 4 および 5 に示す実験データを用いて、式(3)と式(4)における速度パラメータを、次に示す標準偏差 σ [—] が最小になるように、非線形最小二乗法^{3,4)}を用いて求めた結果を、Table 1 および 2 の左半分に示す。

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^N (x_{\text{obs}} - x_{\text{cal}})^2 / N \right]^{0.5} \quad (5)$$

ただし、添字 *obs* および *cal* は、それぞれ実測値および計算値を示す。 N はデータ数である。

計算機は、広島大学計算センターの HITAC 8700-OS7 を使用した。

食品は、試料にばらつきがあり、蒸煮実験データにばらつきを生じて、速度パラメータが相関し合って計算され、 k_n と $k_{n,\alpha}$ の値の温度依存性が得られなくなるこ

Table 1. The rate parameters on the cooking of radish slices

Cooking temp. (°C)	Rate parameters in Ep. (4)			Standard dev. σ (—)	For fixed $n=2.5, \alpha=0.02$	
	$k_{n,\alpha}$ (min^{-1})	n (—)	α (—)		$k_n=2.5, \alpha=0.02$ (min^{-1})	α (—)
99.5	0.727	2.49	0.0193	0.0405	0.723	0.0405
95	0.762	2.86	0.00147	0.0470	0.439	0.0563
90	0.193	2.09	0.0564	0.0487	0.293	0.0503
85	0.345	2.62	0.000327	0.0355	0.179	0.0745
80	0.0787	1.76	0.0112	0.0333	0.0799	0.0620

Table 2. The rate parameters on the cooking of carrot slices

Cooking temp. (°C)	Rate parameters in Eq (3)			For fixed $n=1.5$	
	k_n (min ⁻¹)	n (-)	α (-)	$k_{n=1.5}$ (min ⁻¹)	α (-)
99.5	0.355	2.11	0.0459	0.242	0.0650
95	0.110	1.20	0.0281	0.129	0.0370
90	0.0606	1.55	0.0251	0.0592	0.0253
85	0.0433	1.54	0.0323	0.0423	0.0325
80	0.0242	1.40	0.0367	0.0254	0.0372

とが多い。このような場合には、 n と α の値を、平均値を用いるとか、簡単な温度関係式にして表わすなどして、適当に固定していくことが必要となる。

Table 1 および 2 において、 n と α の値に温度依存性が見られないため、それぞれの平均値を用いて固定することにした。ダイコンでは、式(4)の $k_{n,\alpha}$ を $n=2.5$ 、 $\alpha=0.02$ とし、また、ニンジンでは、式(3)の k_n を $n=1.5$ として計算した。その結果を、Table 1 および 2 の右半分に示し、得られた速度パラメータによる計算値を Fig. 4 および 5 に実線で示す。破線は、 n と α の値を固定しない場合の計算値を参考として示したものである。実線と破線の比較より、ダイコンの場合には低温域で、また、ニンジンの場合には高温域で、 n と α の平均値による固定に少々無理があるようである。

ダイコンの $n=2.5$ 、 $\alpha=0.02$ とした $k_{n,\alpha}$ と、ニンジンの $n=1.5$ とした k_n についてのアルレニウス線図を Fig. 6 に示す。本研究においてアルレニウス式は、それぞれ次のように表わせる。

ダイコン薄片の蒸煮:

$$k_{n,\alpha}=6.43 \times 10^{17} \exp(-3.05 \times 10^4/R_g T) \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (6)$$

ニンジン薄片の蒸煮:

$$k_n=1.69 \times 10^{18} \exp(-3.22 \times 10^4/R_g T) \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (7)$$

ただし、 $R_g=1.987 \text{ cal/g-mol} \cdot ^\circ\text{K}$: 気体定数、 T [°K]: 蒸煮温度である。

本研究において、ダイコンとニンジン薄片で得られた活性化エネルギーの値 30.5, 32.2 kcal/g-mol は、前報^{1,2)}において、ジャガイモとサツマイモ薄片(式(4)において、 $n=1.0$ 、 $\alpha=0.1$ とした蒸煮速度式)で得られた値 29.6, 34.1 kcal/g-mol によく似た値である。

本研究では、蒸煮速度を簡単な衝撃貫通法により測定し、物性的な見地に立って蒸煮速度式を設定してきたが、栄養、味、香り、舌ざわりなども考慮し、式(2)で

Fig. 6. Arrhenius plots of the cooking of radish and carrot slices

定義した蒸煮率 x のどのあたりの値が調理食品として適当であるかを個々の食品について、各種利用目的に対して検討を進めていけば、より実的なものにしていけるものと考えられる。

4. 要約

根菜類の工業的に有用な簡単な蒸煮速度式を得ることを目的として、前報^{1,2)}では、デンプン質系のジャガイモとサツマイモ薄片の蒸煮実験を行った。本報は、これに引続き、繊維質の多いものとしてダイコンとニンジン薄片の蒸煮実験を、温度範囲 80~99.5°C において行った。蒸煮速度の測定には、衝撃貫通法^{1,2)}を使用した。ダイコンとニンジン薄片の蒸煮速度式として、次式を得ることができた。

ダイコン薄片の蒸煮:

$$dx/d\theta = 6.43 \times 10^{17} \exp(-3.05 \times 10^4/R_g T) (1-x)^{2.5}(x+0.02) \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

ニンジン薄片の蒸煮:

$$dx/d\theta = 1.69 \times 10^{18} \exp(-3.22 \times 10^4/R_g T) \times (1-x)^{1.5} \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

ただし、 x [-] は蒸煮率、 θ [min] は蒸煮時間、 T [°K] は蒸煮温度、 $R_g=1.987 \text{ cal/g-mol} \cdot ^\circ\text{K}$ は気体定数である。

文 献

- 1) KUBOTA, K., OSHITA, K., HOSOKAWA, Y., SUZUKI, K. and HOSAKA, H.: *J. Fac. Fish. Anim. Husb., Hiroshima Univ.*, 17, 97 (1978).
- 2) 久保田 清・細川嘉彦・鈴木寛一・保坂秀明: ニューフードインダストリー, 21 (3), 33 (1979).
- 3) KUBOTA, K.: *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 18, 11 (1979).
- 4) 久保田 清: 食品工業, 22 (12), 73 (1979).
[昭和54年6月20日受理]