

## 野菜の加熱による軟化速度と硬化現象

香西みどり

### 1. はじめに

食品が最適な可食状態になるまでの加熱時間、すなわち最適加熱時間を科学的手法により予測することは嗜好的のみならず、省エネルギー的にも重要な課題である。食品工業の分野では加熱殺菌の最適条件の予測法が確立されており、成書も多い<sup>1,2)</sup>。しかし、食品の変化を定量的に把握すると同時に人間の感覚評価を考慮した最適加熱条件の予測に関する研究は非常に少ない<sup>3~7)</sup>。

食品を加熱すると種々の変化が起こり、通常は温度とともに変化速度が大きくなる。食品の中でも特に野菜は適度な歯ごたえが好まれ、加熱温度や時間の制御が難しいとされており、野菜の加熱による軟化に対して軟化の速度定数が測定されている<sup>3~5,7~15)</sup>。加熱による変化速度を表す場合、実用的な指標であるZ値(食品の反応速度を10倍にするのに必要とされる温度変化)やC値(100°C以外の温度における食品の変化と同程度の変化を得るのに必要な100°Cでの加熱時間)を用いることもあるが<sup>16~18)</sup>、本稿では反応の速度式で表す方法について述べる。従来は野菜の加熱による軟化に対してのみ速度論的解析が行われてきたが、実際は軟化と同時に硬化が起こっており、加熱温度によって両者の現れ方が異なる<sup>19,20)</sup>。硬化は60°C付近で顕著に起こり、いったん硬化するとその後の加熱による軟化が抑制され、組織強度の保持に寄与する<sup>21~25)</sup>。このような硬化現象は加熱殺菌などの前処理に利用されているが<sup>26~31)</sup>、これまで定量的な扱いはまったくなされていない。筆者らはこの点に着目し、普遍的な硬さの定式化を目的として、軟化と同時に硬化をみつかった統一的な速度論的解析を試みた<sup>32)</sup>。

本稿では、まず従来行われてきた軟化の速度論的研究として、硬化の影響の比較的小さい高温域での近似的な扱い方について述べる。つぎに硬化を考慮し、広い温度範囲に適用可能な速度式を設定するために筆者らが構築した新しいモデルについて紹介する。

### 2. 野菜の軟化の速度論

これまで野菜の軟化に対する速度論的解析が多く報告されている<sup>3~5,7~15)</sup>。これらは以下に述べるように硬さの測定方法、速度式の設定の方法がそれぞれ異なるものであるが、いずれも軟化の速度定数の温度依存性がアレニウスの式により得られている (Table I)。

松裏ら<sup>3~5)</sup>はテクスチュロメーターにより野菜の硬さを測定し、適度な煮熟状態に至るまでの軟化を一次の速度式に近似した。久保田ら<sup>8,9)</sup>は物性測定用として衝撃貫通試験装置を作製し、根菜類の硬さを測定した。加熱による軟化に対して蒸煮機構が解明できない場合には経験的な速度式が有用であるとして、n次の速度式を設定し、ジャガイモ、サツマイモは1次、ダイコンは2.5次およびニンジンに1.5次を適用した。Huangら<sup>10)</sup>はインストロン試験機によるback extrusion cellにより豆類や根菜類の硬さを測定し、加熱過程を前半(100°Cの場合は加熱開始後約15分)とそれ以降の後半に分け、それぞれを1次反応速度式に近似した。加熱前半の速度定数の方が後半のそれよりかなり大きく、加熱前半の急激な軟化は主にペクチンが、後半の緩やかな変化はそれ以外の物質が原因であろうと推察している。また加熱時間が短い場合を除くと軟化過程を単純な1次反応で記述するのは難しいことを示唆している。Kozempel<sup>11)</sup>も同様の方法によりジャガイモの軟化の速度定数を求めた。85.5~110°Cでは加熱の全過程を1つに、また74~79°Cにおいては加熱

\* お茶の水女子大学生活科学部

## 野菜の加熱による軟化速度と硬化現象

Table 1. 野菜の軟化の活性化エネルギーおよび頻度因子

試料	温度範囲 (°C)	活性化エネルギー (kJ/mol)	頻度因子 (min <sup>-1</sup> )	文献	
ジャガイモ	80—99.5	124	$9.96 \times 10^{16}$	Kubota et al. 8)	
	74—110	127	$7.81 \times 10^{16}$	Kozempel et al. 11)	
	85—99.5	145	$6.99 \times 10^{19}$	松裏他 4)	
	85—105	(前半)	171	$1.62 \times 10^{23}$	岡崎他 7)
		(後半)	123	$1.92 \times 10^{16}$	
85—105	160	$6 \times 10^{23}$	岡崎 13)		
サツマイモ	80—99.5	143	$7.33 \times 10^{19}$	Kubota et al. 8)	
	85—99.5	170	$5.25 \times 10^{19}$	松裏他 4)	
ダイコン (dark red)	80—99.5	128	$6.43 \times 10^{17}$	久保田他 9)	
	104—121	(前半)	95		Huang et al. 10)
		(後半)	54		Huang et al. 10)
	104—121	(前半)	113		Huang et al. 10)
(後半)		77		Huang et al. 10)	
ニンジン	85—99.5	110	$6.01 \times 10^{14}$	松裏他 4)	
	80—99.5	(前半)	135	$1.69 \times 10^{18}$	久保田他 9)
		(後半)	64		Huang et al. 10)
	90—120	113		Paulus et al. 12)	
85—99.5	98	$1.58 \times 10^{13}$	松裏他 4)		
サトイモ	85—99.5	147	$1.13 \times 10^{20}$	松裏他 4)	
西洋カボチャ	85—99.5	112	$4.79 \times 10^{15}$	松裏他 4)	
日本カボチャ	85—99.5	101	$7.59 \times 10^{13}$	松裏他 4)	
カブ	85—99.5	128	$9.60 \times 10^{17}$	松裏他 4)	
アスパラガス	85—99.5	116	$5.11 \times 10^{15}$	松裏他 4)	
ゴボウ	85—99.5	128	$2.10 \times 10^{16}$	松裏他 4)	

開始後約 20 分までの加熱前半とそれ以降の後半に分け、それぞれを 1 次反応に近似している。Paulus ら<sup>12)</sup> はニンジンの硬さをインストロン試験機による圧縮破断力により測定し、90~120°C における軟化を一次の速度式で近似して速度定数を求めた。岡崎ら<sup>7,13)</sup> はテンシプレッサーによりジャガイモの硬さを測定し、軟化過程を加熱前半 (90°C の場合は加熱開始後約 15 分) とそれ以降の後半に分けそれぞれを一次の速度式に近似し、前半の方が後半より軟化速度が大きいという結果を得ている。さらに岡崎ら<sup>13)</sup> は加熱初期に硬化したジャガイモの硬さの値を加熱の初期値として扱う補正を行い、補正した方がしないものより若干大きな軟化の速度定数となっている。Harada ら<sup>14)</sup> は 90~110°C におけるジャガイモの硬さの経時変化をインストロン試験機によるせん断応力で測定し、適度なテクスチャーになるまでの軟化は一次の速度式、さらに加熱時間を長くすると二次の速度式が適用できるとしている。

以上の通り、これまでの野菜の軟化に対する速度論的研究は、軟化を n 次の速度式とするもの、加熱を前半、後半に分けてそれぞれを 1 次反応速度式に近似さ

せるものおよび限定した範囲に対して一つの 1 次反応速度式で表すものにと分類される。このことは経験的に一次の速度式を適用しただけでは軟化の全過程を表現できないことを示唆するものである。しかし、対象とする範囲を限定すれば、多くの自然現象を記述するのに適用されることの多い一次の速度式は扱いが簡単であり、調理への応用として以下に述べるように人間の感覚評価による最適な煮熟状態と組み合わせた最適加熱時間の予測が可能である。

3. 野菜の最適加熱時間の予測<sup>3,4,33)</sup>

10 種類の野菜の小片試料 (1×1×0.5cm) を 80~99.5°C で加熱し、硬さを測定した結果を 4 種類を例として Fig. 1 に示した。これらの野菜の軟化速度を以下のように解析した。

ここで硬さの変化率として軟化率  $x$  を次のように定義した<sup>9)</sup>。

$$x = \frac{y_0 - y}{y_0 - y_e} \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (1)$$

$y_0$  は硬さの初期値、 $y$  は硬さの測定値、 $y_e$  は軟化の平

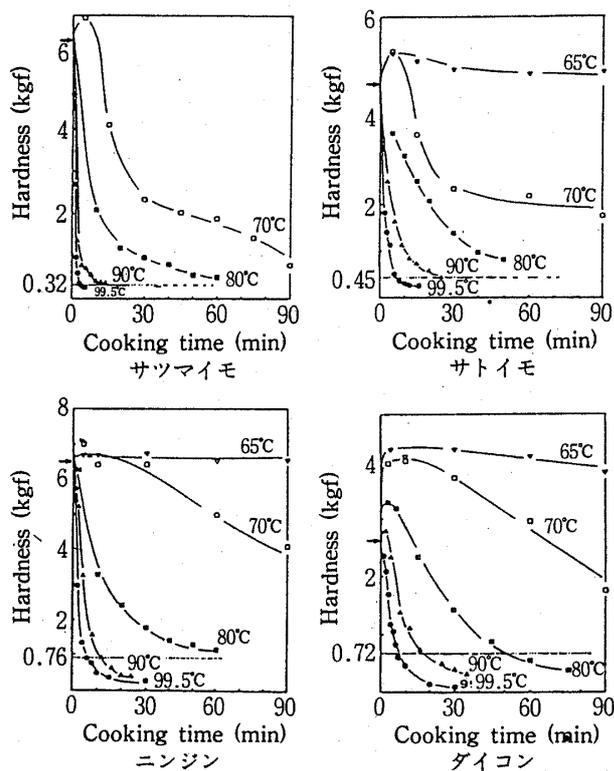


Fig.1 種々の温度における野菜の硬さの経時変化<sup>4)</sup>  
 図中の点線および矢印はそれぞれ最適な硬さおよび硬さの初期値。

衡値である。式 (1) で定義した軟化率  $x$  が一次の速度式に近似できるとすると、

$$\frac{dx}{dt} = k(1-x) \quad (2)$$

$k$  は軟化の速度定数 ( $\text{min}^{-1}$ ),  $t$  は加熱時間 ( $\text{min}$ ) である。式 (2) を変形すると次式が得られる。

$$\ln(1-x) = -kt \quad (3)$$

各試料の  $x$  の実験値を用いて一次反応プロットをとり (Fig. 2), 一回帰式の傾きより各温度における  $k$  の値を算出した。次に  $k$  の対数値を温度の逆数に対してプロットし (Fig. 3), 軟化の速度定数の温度依存性を次のアレニウスの式で表した。

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

$A$  は頻度因子 ( $\text{min}^{-1}$ ),  $E$  は活性化エネルギー ( $\text{J/mol}$ ),  $R$  は気体定数 ( $8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ ) および  $T$  は絶対温度 ( $\text{K}$ ) である。

ここで式 (3) を変形することにより  $99.5^\circ\text{C}$  において軟化率  $x$  が最適軟化率に達するまでの加熱時間, すなわち最適加熱時間を求める式が得られる。

$$\theta = -\frac{1}{k_{99.5}} \ln(1-X) \quad (5)$$

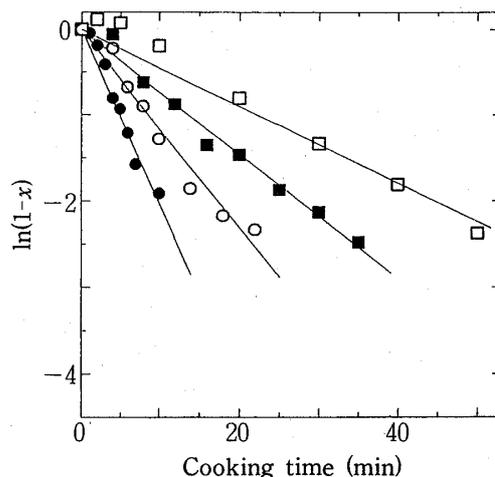


Fig.2 ダイコンの軟化の一次反応プロット<sup>33)</sup>  
 ●,  $99.5^\circ\text{C}$ ; ○,  $95^\circ\text{C}$ ; ■,  $90^\circ\text{C}$ ; □,  $85^\circ\text{C}$ ;  $x$ , 軟化率

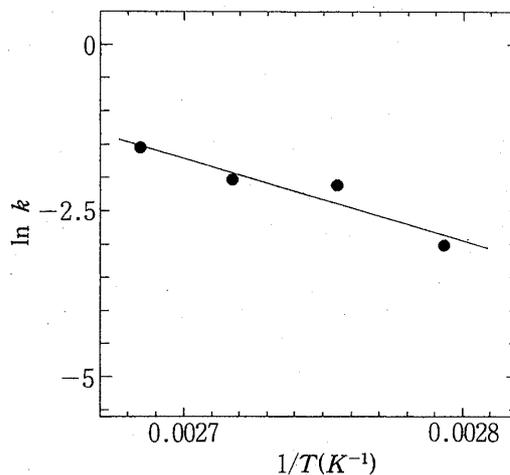


Fig.3 ダイコンの軟化の速度定数のアレニウスプロット<sup>33)</sup>

$\theta$  は最適加熱時間 ( $\text{min}$ ),  $k_{99.5}$  は  $99.5^\circ\text{C}$  における軟化の速度定数 ( $\text{min}^{-1}$ ),  $X$  は最適軟化率である。最適軟化率とは  $99.5^\circ\text{C}$  で加熱したときの煮熟度に対する官能検査を別に行い (Fig. 4), 適度な煮熟度の評点 0 に相当する硬さを軟化率で表したものである。Fig. 5 に各試料の  $k_{99.5}$ ,  $X$  および最適加熱時間を示した。官能検査を行った結果, 最適加熱時間の予測値と実験値はほぼ一致することが確認され, 従来経験的に知られていた野菜の煮えやすさを規定している要因は試料の軟化速度と最適軟化率であることが示唆された。

次に加熱に伴う軟化率の変化を次式により予測した。

$$x = 1 - \exp(-kt) \quad (6)$$

$k$  は速度定数 ( $\text{min}^{-1}$ ),  $t$  は時間 ( $\text{min}$ ) である。80~ $99.5^\circ\text{C}$  における軟化率の計算値と実験値と比較した

野菜の加熱による軟化速度と硬化現象

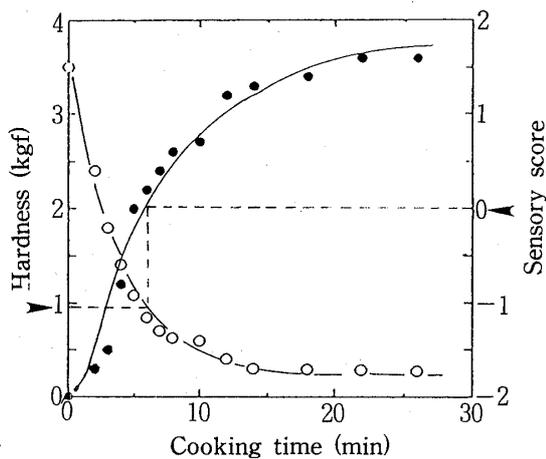


Fig. 4 ジャガイモの煮熟に伴う硬さの変化と官能評価<sup>33)</sup>  
 ●, 官能検査による評点, -2~+2の5段階評点法 (0が適度);  
 ○, テクスチロメーターによる硬さ

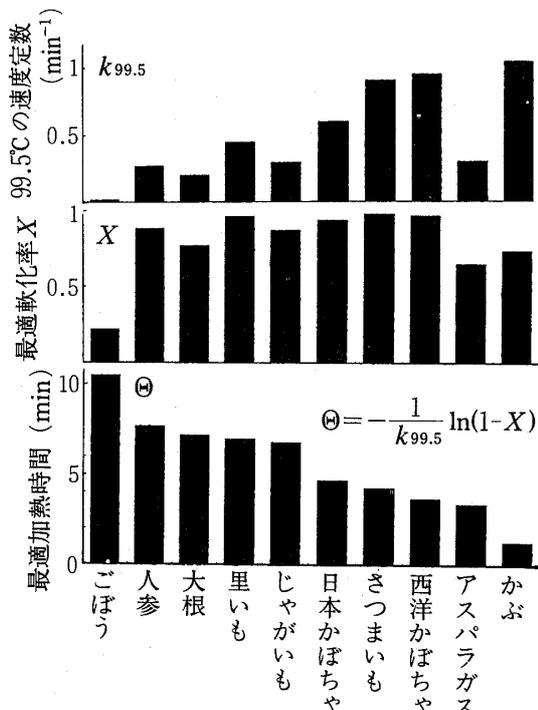


Fig. 5 野菜の小片試料の最適加熱時間<sup>33)</sup>

θ, 最適加熱時間 (min);  $k_{99.5}$ , 99.5°Cにおける軟化の速度定数; X, 最適軟化率

結果 (Fig. 6), 99.5 および 90°C では軟化率の計算値と実験値はよく一致したが, 温度が 80°C になるといずれも計算値の方が実験値より大きな値となった。式 (1) により軟化率  $x$  は 0 から 1 の範囲と定義されたもので, 加熱によって硬さが減少することを前提としている。実際は温度が低下するほど硬化が顕著になり, Fig. 6 に示したように軟化の予測だけでは対応できなくなる。この傾向は久保田ら<sup>8,9)</sup> の報告にもみられ, 軟化を

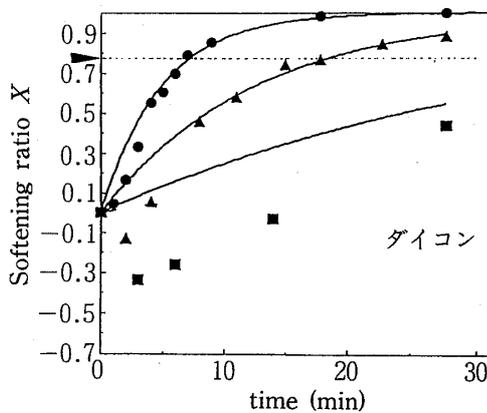
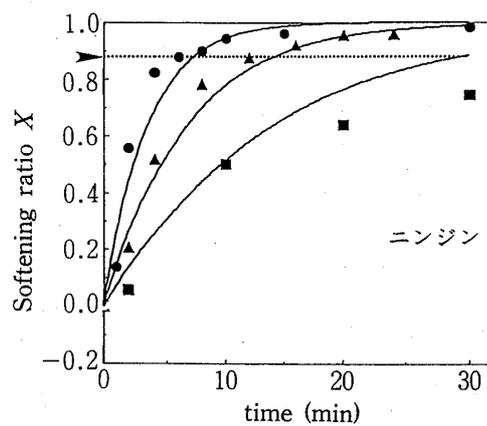


Fig. 6 軟化率の計算値と実験値の比較  
 図中の点線は最適軟化率<sup>33)</sup>

●, 99.5°C; ▲, 90°C; ■, 80°C  
 実線は計算値

一次の速度式に近似した場合は適用温度に限界がある。そこで, 野菜の加熱による硬化と軟化を同時に扱った統一的な解析を行うことが必要になってくる。

4. 野菜の加熱による硬化・軟化の統一的速度論的解析<sup>32,33)</sup>

硬化と軟化は硬さの変化が相反する現象であるから, 同時に起こるときの硬さの変化を定式化するには前出した軟化率を用いることはできない。そこで硬化と軟化の両者の反応のメカニズムに基づいた速度式を設定した。

野菜は加熱によって種々の成分のおよび構造的変化が起こる。デンプンの糊化は加熱した食品の物性に影響するものではあるが, 硬化には関与しないとされており<sup>21)</sup>, またタンパク質の変性は温度が高いほど起こりやすく, 硬化には直接関与していないと考えられる。ペクチンは植物の細胞間隙にあって野菜の組織強度に大きく影響し, 加熱により低分子化や脱メチル反応が起こる。前者は 80°C 以上で顕著に起こるペクチンの非

酵素的な  $\beta$  脱離で軟化の主な原因とされており<sup>34)</sup>, 後者は 50°C 以上の加熱で起こる酵素的脱メチル反応であり, 後続する 2 価の金属イオンとペクチンとの架橋結合の生成が硬化の主な原因であると考えられている<sup>21~24,35)</sup>. 細胞壁の主な成分であるペクチンの加熱による変化や野菜の組織強度の変化との関係については多くの報告があり<sup>36~43)</sup>, 新鮮物可食部の約 0.1~2%<sup>44)</sup> と量的にはわずかであるがペクチンの野菜の硬さに及ぼす影響は大きい。この点に着目し, 野菜の加熱による硬化・軟化の原因をそれぞれペクチンの酵素的脱メチル反応および非酵素的  $\beta$  脱離反応とみなした。

はじめに硬化・軟化を同時に定式化するためのモデルとしてペクチンモデルを構築した。加熱によって総ペクチン  $P_0$  が未変化ペクチン  $P$ , 硬化ペクチン  $P_h$  および軟化ペクチン  $P_s$  に変化し, 試料の硬さに対して  $P$ ,  $P_h$  および  $P_s$  がそれぞれ  $a$ ,  $b$  および  $c$  の割合で影響し, それらの和が全体の硬さを決定すると仮定した。これらの仮定を次の 2 つの式で表した。

$$P_0 = P + P_h + P_s \quad (7)$$

$$y = aP + bP_h + cP_s \quad (8)$$

ここで  $P_0$  はペクチンの総濃度 (kg/kg) であり, 初期値でもある。 $P_h$  は硬化ペクチン濃度 (kg/kg),  $P_s$  は軟化ペクチン濃度 (kg/kg) である。 $y$  は硬さ,  $a$ ,  $b$  および  $c$  はそれぞれ  $P$ ,  $P_h$  および  $P_s$  の単位濃度あたりの硬さであり, 硬さの係数に相当する。

次に硬化ペクチン  $P_h$  は酵素反応であるとの仮定に基づいて生成速度式を設定した。酵素反応については pH および温度が一定の場合, Michaelis-Menten によって酵素反応の速度と基質濃度の関係式が提案されている。ペクチンの酵素的脱メチル反応が Michaelis-Menten の式に従うか否かについて Speiser ら<sup>45)</sup> はペクチンの水溶液における脱エステル反応について検討し, ペクチンのような高分子系の酵素反応には必ずしも Michaelis-Menten の式が適用できないことを明らかにした。従って野菜のような複雑な系における酵素反応は Michaelis-Menten の速度と基質濃度の関係式には従わないであろうと考えられる。そこで硬化ペクチンの生成速度は酵素濃度が高いほどまた未変化ペクチン濃度が高いほど大きいとして次式により表した。

$$\frac{dP_h}{dt} = k_h EP \quad (9)$$

ここで  $P_h$  は硬化ペクチン (kg/kg),  $t$  は時間 (min),  $k_h$  は硬化の速度定数 (kg/kg)<sup>-1</sup>(min<sup>-1</sup>),  $E$  は酵素濃度 (kg/kg),  $P$  は未変化ペクチン (kg/kg) である。一般に酵素は熱によって失活し, 本酵素についても同

様の報告<sup>46)</sup> があることから, この失活過程を一次反応として次式で表した。

$$\frac{dE}{dt} = -k_E E \quad (10)$$

ここで  $E$  は酵素濃度 (kg/kg),  $k_E$  は酵素失活の速度定数 (min<sup>-1</sup>),  $t$  は時間 (min) である。式 (10) を変数分離し,  $t=0$  のとき  $E=E_0$  とすると

$$E = E_0 \exp(-k_E t) \quad (11)$$

式 (11) を式 (9) に代入すると次式が得られる。

$$\frac{dP_h}{dt} = k_h E_0 \exp(-k_E t) P \quad (12)$$

式 (12) が硬化ペクチン  $P_h$  の生成速度式となる。

一方, 軟化ペクチンの形成には酵素が関与していないことから, その生成速度 ( $dP_s/dt$ ) は単に未変化ペクチン  $P$  の濃度に比例するとして次の一次反応速度式を適用した。

$$\frac{dP_s}{dt} = k_s P \quad (13)$$

ここで  $P_s$  は軟化ペクチン,  $P$  は未変化ペクチン,  $k_s$  は軟化の速度定数である。

次に式 (1), (12), (13) を連立させ, ペクチンモデルの濃度変化を以下のような時間の関数で表した。

$$\frac{P}{P_0} = \exp\{K_h[\exp(-k_E t) - 1] - k_s t\} \quad (14)$$

$$K_h = \frac{k_h E_0}{k_E} \quad (15)$$

$$\frac{P_h}{P_0} = \int k_h E_0 \exp(-k_E t) \left(\frac{P}{P_0}\right) dt \quad (16)$$

$$\frac{P_s}{P_0} = \int k_s \left(\frac{P}{P_0}\right) dt \quad (17)$$

式 (16), (17) では  $P/P_0$  の項が式 (14) によって表される複雑な関数であるためこれ以上解析的には解けない。しかし, 式 (14) により算出される ( $P/P_0$ ) vs.  $t$  の曲線を一定の十分小さい時間間隔で区切り, その区間内では  $P/P_0$  が一定とすれば, 近似的に数値解を求めることができる。本研究では対数平均値を用いた。次にペクチンの変化を硬さのそれに変換する。式 (2) の両辺を  $P_0$  で割ると

$$\frac{y}{P_0} = a\left(\frac{P}{P_0}\right) + b\left(\frac{P_h}{P_0}\right) + c\left(\frac{P_s}{P_0}\right) \quad (18)$$

となり, これを次式のように書き換えた。

$$Y = a\left(\frac{P}{P_0}\right) + b\left(\frac{P_h}{P_0}\right) + c\left(\frac{P_s}{P_0}\right) \quad (19)$$

$Y$  は  $y/P_0$  で定義された硬さである。式 (19) の各項に式 (14), (16), (17) を代入することによってペクチンの変化が硬さに変換され, 硬さの予測値を得ることができる。式 (19) は硬さの予測式である。

## 野菜の加熱による軟化速度と硬化現象

ここで  $a$ ,  $b$ ,  $c$  は温度に関係しない定数であり、温度に依存するのは生成速度式 (12) (13) における各速度定数である。加熱前では  $P_h$ ,  $P_s$  が 0 であるからこのときの硬さ、すなわち初期値より  $a$  が求められる。また、主として硬化が起こり、みかけ上軟化が進行しない温度では近似的に  $P_s$  が 0 とみなせるのでこのときの硬さ、すなわち硬化の平衡値より  $b$  が求められる。同様にして主として軟化が起こり、近似的に  $P_h$  を 0 とみなせる高温での硬さ、すなわち軟化の平衡値より  $c$  が求められる。各速度定数は対応する温度範囲における硬さの経時変化より求められる。

次に硬さの予測式の実験的な検証を行った。試料は日常よく食され、加熱による硬化・軟化の明瞭である根菜類とし、ダイコン、ニンジン、ゴボウおよびジャガイモを用いた。試料の大きさは  $1 \times 1 \times 0.5 \text{ cm}$  とし、硬さはテクスチュロメーターにより測定した。はじめに硬さの係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  を求めた (Table 2)。

次に硬化・軟化の速度定数を、それぞれ  $54 \sim 63^\circ\text{C}$ ,  $94 \sim 99.5^\circ\text{C}$  の範囲で求めた。Fig. 7 にダイコンの例を示したように、この温度範囲ではみかけ上軟化が起こ

Table 2. 硬さの予測式における硬さの係数  $a$ ,  $b$ ,  $c$ <sup>32)</sup>

試料	$a$	$b$	$c$	$b/a$	$c/a$
ダイコン	22	40	1	1.8	0.05
ニンジン	48	69	2	1.4	0.04
ゴボウ	50	68	8	1.4	0.16
ジャガイモ	27	39	1	1.4	0.04

$a$ , 硬さの初期値に相当;

$b$ , 硬化の平衡値に相当;

$c$ , 軟化の平衡値に相当

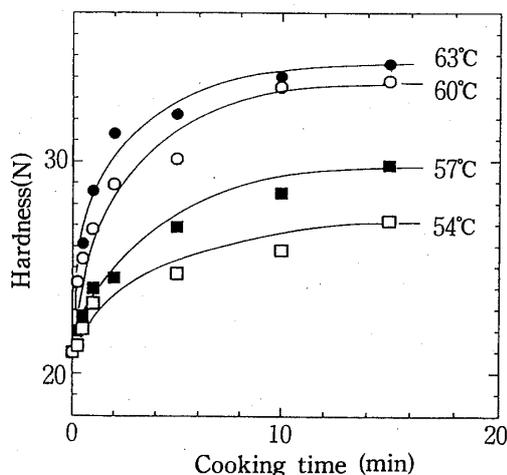


Fig. 7 ダイコンの低温域 ( $54 \sim 63^\circ\text{C}$ ) における硬さの変化<sup>33)</sup>

1N  $\approx$  0.1kgf

Table 3. 根菜類の軟化および酵素失活の活性化エネルギーと頻度因子<sup>32)</sup>

試料	$k_E$		$k_S$	
	$A (\text{min}^{-1})$	$E_a (\text{kJ/mol})$	$A (\text{min}^{-1})$	$E_a (\text{kJ/mol})$
ダイコン	$1.2 \times 10^{18}$	120	$1.4 \times 10^{16}$	120
ニンジン	$1.5 \times 10^8$	51	$4.5 \times 10^{11}$	88
ゴボウ	$3.8 \times 10^{15}$	99	$2.5 \times 10^{16}$	130
ジャガイモ	$5.1 \times 10^{14}$	99	$2.8 \times 10^{18}$	140

$k_E$ , 酵素失活の速度定数 ( $\text{min}^{-1}$ );  $k_S$ , 軟化の速度定数 ( $\text{min}^{-1}$ );  $A$ , 頻度因子 ( $\text{min}^{-1}$ );  $E_a$ , 活性化エネルギー ( $\text{kJ/mol}$ )

らず、温度が高いほど硬化が進行した。そこで、式 (7), (14), (19) において軟化に関わる項を近似的に 0 とみなして、酵素失活の速度定数  $k_E$  を実験値より求めた。同様に高温域では硬化に関わる項を近似的に 0 とみなして、軟化の速度定数を求めた。Table 3 に  $k_E$  および  $k_S$  の活性化エネルギーを示した。

次に各試料について  $60 \sim 99.5^\circ\text{C}$  における硬さの予測値を算出し、実験値と比較した (Fig. 8)。図中の X 軸に平行な 2 本の線は官能検査によって得られた適度な硬さの範囲を示している。Fig. 8 において低温域では硬化が、高温域では主として軟化が起こり、高温域ではいったん硬化してから軟化する過程が計算により再現された。これらの計算値と実験値は全体によく一致しており、新しいモデルに基づいた硬さの定式化はほぼ成功したといえる。いずれの試料についても高温と低温域の中間的な温度域において加熱後半で実験値と計算値とのズレがみられる傾向がみられ、この理由の一つとして硬化と軟化の相互作用が考えられる。相互作用の影響が無視できないほど大きい場合は考慮する必要があるが、その場合は式が非常に複雑になる。このように食品を扱う際の実験精度と定式化のための近似との関係は今後の検討課題であろう。

## 5. おわりに

以上、野菜の調理加工における硬さの予測と制御という観点から、扱いの簡単な経験的な一次の速度式を適用した場合と反応機構を考慮した硬化・軟化のモデルに基づく速度式の設定例について述べた。食品の加熱による変化を定式化するには、食品を加熱するとはどういうことなのかという本質的な問題に立ち返る必要があると思われる。野菜の硬化は組織強度を保持して軟化と拮抗する現象であり、 $60^\circ\text{C}$  付近の低温域で顕著に起こるこの現象を制御することは野菜の加熱の重要なポイントであるともいえる。野菜や豆など植物性

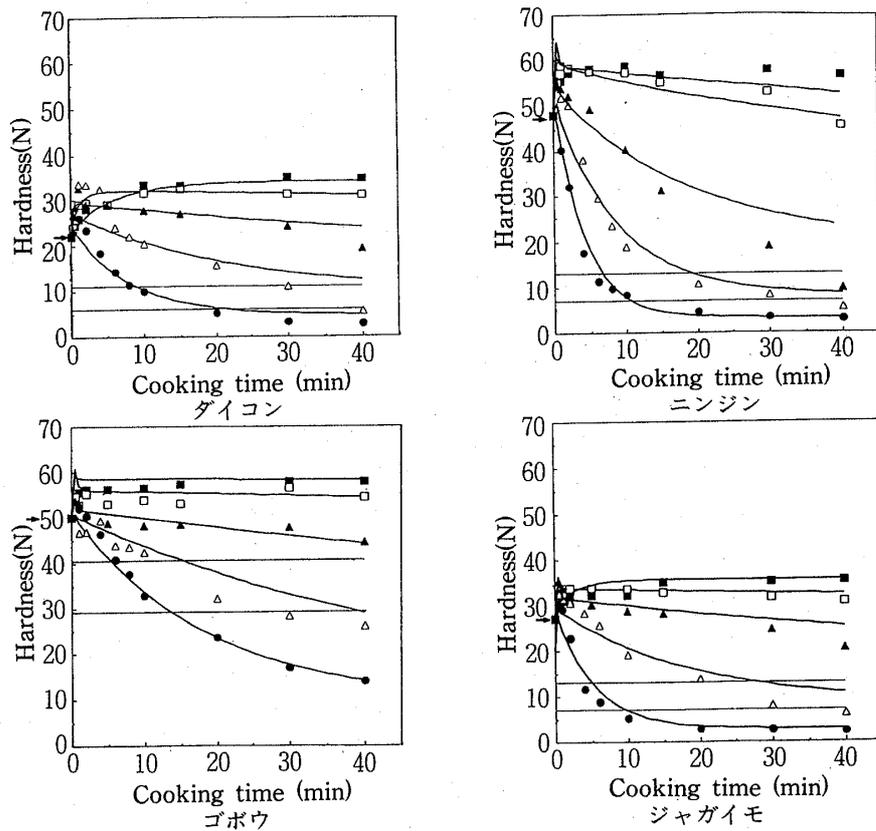


Fig.8 硬さの予測式による硬さの計算値と実験値の比較<sup>32)</sup>

■, 60°C; □, 70°C; ▲, 80°C; △, 90°C; ●, 99.5°C  
 図中の X 軸に平行な 2 本の線は最適な硬さの範囲  
 実線は硬さの計算値 (式 (14), (16), (17))  
 1N≒0.1kgf

食品の硬化の機構<sup>21,23,47-52)</sup>がより詳細に解明されれば、野菜の調理加工における物性制御に大きく貢献するものと考えられる。

文献

- 1) 芝崎勲：新・食品殺菌工学，光琳（1983）
- 2) 久保田清，宇野順一，小林猛：食品反応工学，食品工学基礎講座 10，光琳（1990）
- 3) 香西みどり，島田淳子：煮熱によるジャガイモの軟化度と最適加熱時間の予測，日食工誌，**32**，360-364（1985）
- 4) 松裏容子，香西みどり，畑江敬子，島田淳子：野菜の最適加熱時間の予測，日食工誌，**36**，97-102（1989）
- 5) 香西みどり，中川弥子，谷澤容子，畑江敬子，島田淳子：根菜類の収穫月，鮮度および部位が最適加熱時間の予測に及ぼす影響，日食工誌，**39**，41-48（1992）
- 6) 渋谷祥子，杉山久仁子：日本家政学会第 44 回大会研究発表要旨集，p.148，（1992）
- 7) 岡崎尚，鈴木寛一，前重静彦，久保田清：蒸煮によるジャガイモの軟化現象に対する速度論的解析，日食工誌，**38**，784-788（1991）
- 8) Kubota, K., Oshita, K., Hosokawa, Y., Suzuki, K.

and Hosaka, H.: Studies of cooking-rate equations of potato and sweet potato slices., *J. Fac. Fish Anim. Husb., Hiroshima Univ.*, **17**, 97-106 (1978)

- 9) 久保田清，高崎かほる，藤本真紀子，鈴木寛一，保坂秀明：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，日食工誌，**27**，157-160（1980）
- 10) Huang, Y. T. and Bourne, M. C.: Kinetics of thermal softening of vegetables., *J. Texture Studies*, **14**, 1-9 (1983)
- 11) Kozempel, M. K.: Modeling the kinetics of cooking and precooking potatoes, *J. Food Sci.*, **53**, 753-755 (1988)
- 12) Paulus, K. and Saguy, I.: Effect of heat treatment on the quality of cooked carrot., *J. Food Sci.*, **45**, 239-241 (1980)
- 13) 岡崎尚，鈴木寛一，前重静彦，久保田清：非等温および等温熱処理期間に進行するジャガイモの軟化現象のシミュレーション，日食工誌，**39**，295-301（1992）
- 14) Harada, T., Tirtohusodo, H. and Paulus, K.: Influence of the composition of potatoes on their cooking kinetics., *J. Food Sci.*, **50**, 463-468 (1985)

## 野菜の加熱による軟化速度と硬化現象

- 15) Bourne, M. C.: Effect of blanch temperature on kinetics of thermal softening of carrots and green beans., *J. Food Sci.*, **52**, 667, 690 (1987)
- 16) Harada, T., Tirtokusodo, H. and Paulus, K.: Influence of temperature and time on cooking kinetics of potatoes., *J. Food Sci.*, **50**, 459-462 (1985)
- 17) Pravisani, C. I. and Calvelo, A.: Minimum cooking time for potato strip frying., *J. Food Sci.*, **51**, 614-617 (1985)
- 18) Quast, D. C. and da Silva, S. D.: Temperature dependence of the cooking rate of dry legumes., *J. Food Sci.*, **42**, 370-374 (1977)
- 19) 瀧上倫子, 小西英子: 野菜の加熱調理に関する研究 (第3報), 野菜の硬化に及ぼす予備加熱温度と時間の影響について, 岡山県立短大紀要, **22**, 45-53 (1978)
- 20) 小西英子, 瀧上倫子, 岡本賢一: 調理の際の野菜の硬化, 栄養と食糧, **28**, 44-46 (1975)
- 21) Bartolome, L. G. and Hoff, E.: Firming of potatoes: Biochemical effects of preheating, *J. Agr. Food Chem.*, **20**, 266-270 (1972)
- 22) 新田ゆき: ジャガイモおよび他の野菜果実類のペクチン質に及ぼす予加熱の効果, 家政誌, **26**, 173-176 (1975)
- 23) 真部孝明: ダイコンの予備加熱による硬化現象機構について, 日食工誌, **27**, 234-239 (1980)
- 24) 瀧上倫子: 調理のさいのだいこんの軟化とペクチン質の変化との関係, 家政誌, **37**, 1029-1038 (1986)
- 25) Wu, A. and Chang, W. H.: Influence of precooking on the firmness and pectic substances of three stem vegetables, *International J. Food Sci. and Technol.*, **25**, 558-565 (1990)
- 26) Van Buren, J. P., Moyer, J. C., Wilson, D. E., Robinson, W. B. and Hand, D. B.: Influence of blanching conditions on sloughing, splitting and firmness of canned snap beans., *Food Technol.*, May, 233-236 (1960)
- 27) Hoogzand, C. and Doesburg, J. J.: Effect of blanching on texture and pectin of canned cauliflower, *Food Technol.*, March, 160-163 (1961)
- 28) Van Buren, J. P.: Heat treatments and the texture and pectins of red tart cherries., *J. Food Sci.*, **39**, 1203-1205 (1974)
- 29) Labelle, R. L.: Heat and calcium treatments for firming red tart cherries in hot-fill process: *J. Food Sci.*, **36**, 323-326 (1971)
- 30) Lee, C. Y., Bourne, M. C. and Van Buren, J. P.: Effect of blanching treatment on the firmness of carrots., *J. Food Sci.*, **44**, 615-616 (1979)
- 31) Steinbuch, E.: Improvement of texture of frozen vegetables by stepwise blanching treatments, *J. Food Technol.*, **11**, 313-315 (1972)
- 32) Kasai, M., Hatae, K., Shimada, A. and Iibuchi, S.: A kinetic study of hardening and softening processes of vegetables during cooking., *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, **41**, 933-941 (1994)
- 33) 香西みどり: 野菜の加熱による硬化・軟化過程の速度論的解析と最適加熱時間の予測, ニューフードインダストリー, **36**, 7-16 (1996)
- 34) Albersheim, P., Neukom, H. and Deuel, H.: Splitting of pectin chain molecules in neutral solutions, *Arch. Biochem. Biophys.*, **90**, 46-51 (1960)
- 35) 小沢潤二郎: ペクチン質分解酵素, 日食工誌, **10**, 338-344 (1963)
- 36) 田村咲江: 野菜の煮熟軟化の機構について (第1報) ダイコン根部の煮熟軟化に及ぼす食塩添加の影響, 家政誌, **38**, 375-381 (1987)
- 37) 田村咲江: 野菜の煮熟軟化の機構について (第2報), 家政誌, **40**, 995-1002 (1989)
- 38) 田村咲江: 野菜の煮熟軟化の機構について (第3報), 家政誌, **40**, 1003-1009 (1989)
- 39) Fuchigami, M.: Relationship between pectic compositions and the softening of the texture of Japanese radish roots during cooking, *J. Food Sci.*, **52**, 1317-1320 (1987)
- 40) 瀧上倫子: 野菜を加熱調理したさいの軟化の難易とペクチン質との関係, 家政誌, **38**, 465-473 (1987)
- 41) Van Buren, J. P.: The chemistry of texture in fruits and vegetables, *J. Texture Studies*, **10**, 1-23 (1979)
- 42) Reeve, R. M.: Pectins, starch and texture of potatoes: some practical and theoretical implications, *J. Texture Studies*, **8**, 1-17 (1977)
- 43) 真部正敏: 果実組織の硬度とペクチン質, 日食工誌, **28**, 653-659 (1981)
- 44) 川端晶子, 澤山茂: 野菜類のペクチン含量について, 栄養誌, **31**, 32-36 (1973)
- 45) Speiser, R., Eddy, C. R. and Hills, C. H.: Kinetics of deesterification of pectin., *J. Phys. Chem.*, **49**, 563-579 (1945)
- 46) Van Buren, J. P., Moyer, J. C. and Robinson, W. B.: Pectin methylesterase in snap beans., *Food Technol.*, 1962
- 47) Liu, K., Phillips, R. D., Hung, Y., Shewfelt, R. L. and McWatters, K. H.: Hard-to-cook defect in cowpeas: Storage-induced and treatment-induced development., *J. Food Sci.*, **57**, 1155-1160 (1992)
- 48) Liu, K., Phillips, R. D. and Hung, Y.: Development of Hard-to-cook defect in cowpeas: Role of pectin methylesterase., *J. Agric. Food Chem.*, **40**, 949-952 (1992)
- 49) Liu, K., Shewfelt, R. L., Phillips, R. D. and Hung, Y.: Hard-to-cook state in cowpeas-influence of pretreatment and cooking on electrolyte leakage solids-loss and water absorption., *Int. J. Food Sci. Technol.*, **27**, 683-690 (1992)
- 50) Hentges, D. L., Weaver, C. M. and Nielsen, S. S.:

- Changes of selected physical and chemical components in the development of the hard-to-cook bean defect, *J. Food Sci.*, **56**, 436-442 (1991)
- 51) 山本文子, 香西みどり, 畑江敬子, 島田淳子: 大根の物性に及ぼす高圧処理および処理後の放置の影響とその機構, *日食工誌*, **39**, 571-577 (1992)
- 52) Kasai, M., Hatae, K., Shimada, A. and Iibuchi, S.: Pressure pretreatment of vegetables for controlling the hardness before cooking, *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, **42**, 594-601 (1995)