

ジャガイモのクッキング進行中における クッキング速度に関する研究

張 戈・久保田 清・羽倉 義雄

広島大学生物生産学部, 東広島市 724

1993年9月22日 受付

要 旨 これまでにジャガイモを例として, クッキング速度に関する多くの研究が行われてきているが, 速度パラメータの値が異なっている。前報 (張ほか, 1993) では, クッキング率を求めるレオロジー特性の測定法の違いなどによる影響があると考えられる結果を得た。

本研究では, ジャガイモの加熱湯中のクッキングにおけるクッキング速度の測定を, 前報で示した定速貫通法を用いて, 加熱温度下と冷却後温度下とで行って比較検討した。クッキング進行中におけるクッキング速度が測定温度を変えると異なってくると考えられる結果を得た。

キーワード: クッキング, ジャガイモ, 食品, 速度式

緒 言

食品を各種加工処理する装置, プロセスの設計, 操作計算を進めていくためには, 進行中におけるクッキング率などを測定して, 簡便なクッキング速度式などを設定 (KUBOTA *et al.*, 1978, 久保田ほか, 1981, 1988, 張ほか, 1993など) していくことが必要となる。

試料としてジャガイモが取り扱いが容易なことからジャガイモを例としたクッキング速度式などを設定する研究が行われてきている。ジャガイモのクッキングにおける速度は, 試料の品種, 加熱方法, 冷却方法, クッキング率の定義, レオロジー特性の測定方法などの違いによって大きく異なってくると考えられる。

前報 (張ほか, 1993) において, クッキング率を求めるレオロジー特性の測定法が衝撃貫通法と定速貫通法とのように違ってくると思なると考えられる結果を得た。また, 加熱処理試料の冷却方法, 測定温度による影響などもあるのではないかと考えられた。

本研究では, 円柱状ジャガイモの側面を断熱して両底面から加熱湯中で加熱するクッキングを行って, 試料中心部のクッキング率の変化を定速貫通法で測定する実験を行った。クッキング速度の測定を加熱温度下と冷却後温度下とで行って速度パラメータの値を求める検討を行った。試料温度変化を熱拡散率を求めておいて計算値で与えることによって速度パラメータの値を算出する方法を提案した。

実 験 方 法

試料 市販のジャガイモ (北海道産メークイン) を用い, コルクボーラとカッターで直径 2.3 cm, 長さ 2.5 cm の円柱状にしたものを試料として供した。試料の周辺に内径 2.3 cm, 外径 2.9 cm, 長さ 2.5 cm のアクリル管と, 内径 2.9 cm, 外径 6.7 cm, 長さ 2.5 cm にしたシリコンゴム栓を取りつけ側面を断熱して加熱できるようにした。試料を 100°C の加熱湯中に入れ, 試料の両底面から加熱してクッキングを行った。

前報 (張ほか, 1993) で示した片底面からだけ加熱する方法は, 非加熱側底面において無視できない温度変化が起これ半無限平板を仮定した解析ができなくなった。本研究では, 無限平板を仮定して数値解析が可能となるクッキング方法を提案した。

クッキング率の測定 クッキング率はサン科学製の R-UDJ-DM II 型のレオメータを使ってレオロジー

特性の変化を測定することによって求めた。レオロジー特性は、直径 3 mm の円柱状プランジャーが定速 (2 cm/min) で中心部を貫入していくときの貫通応力 F [N] の値として求めた。加熱湯中でクッキングした試料を加熱温度下と冷却後温度下とで測定した。

加熱温度下の測定は、加熱湯中から大気中に取り出した試料を 1.5~2 分後に測定に供した測定である。試料を厚くしており、大気中では試料表面の境膜が大きく冷却が起りにくいため、中心部の温度は暫く上昇を続けると仮定した。冷却後温度下の測定は、加熱湯中から取り出した試料を 20°C の水中で 5 分冷却して行った測定である。中心部の温度は暫く上昇をしてから下降した。

温度変化の測定 アルメル・クロメル熱電対 (直径 0.06 cm×2 本) を試料の中心部に挿入し、加熱湯中および冷却水中における温度の経時変化を測定した。

クッキング率とクッキング速度式

クッキング率 前報 (張ほか, 1993) と同様にクッキング率を次式により表わす。

$$x = (F_0 - F) / (F_0 - F_c) \quad (1)$$

ここで、 F [N] はクッキング時間 θ [min] における試料中心部における定速貫通応力、 x [-] はクッキング率である。また、 F_0 , F_c [N] は、初期および平衡時における値である。

クッキング速度式 前報 (張ほか, 1993) と同様にべき乗型曲線、S 字型曲線に対して利用できる汎用的な経験的速度式 (KUBOTA, 1979) の適用を試みる。

$$dx/d\theta = k_n \cdot (1-x)^n \quad (2)$$

$$dx/d\theta = k_\beta \cdot (1-x)^m (x+\beta) \quad (3)$$

$$k_n \text{ または } k_\beta = A \cdot \exp[-E/(Rg \cdot T)] \quad (4)$$

ここで、 x [-], T [°K] = t [°C] + 273.2 は、時間 θ [min] におけるクッキング率とクッキング温度である。 Rg は気体定数 1.987 cal/(g·mol·°K) である。速度定数 k_n , k_β [min⁻¹], 次数 n , m [-], S 字型定数 β [-], 頻度因子 A [min⁻¹] および活性化エネルギー E [cal/g·mol] 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。

伝熱速度式 無限平板が仮定できる試料内部の温度変化は次式により表わされる。

$$Y = (t - t_{he}) / (t_0 - t_{he}) \quad (5)$$

$$\partial Y / \partial \theta = \alpha (\partial^2 Y / \partial y^2) \quad (6)$$

ここで、 t [°C], Y [-] は、時間 θ [min] における試料内部の温度と無次元温度である。 t_0 , t_{he} [°C] は、試料の初期温度 (20°C) と加熱湯温度 (100°C) である。 y [cm] は、試料内部の表面からの位置を示す。熱拡散率 α [cm²/min] が実験データから求めることになるパラメータである。

実験結果と考察

試料の温度変化 試料の中心部における温度変化を Fig. 1 に示す。20°C の試料を 100°C の加熱湯中に入れ両底面から加熱した結果と、20°C の冷却水に入れ冷却した結果とを合わせて示した結果である。40 分加熱, 20 分加熱して 5 分冷却, 10 分加熱して 5 分冷却, 5 分加熱して 5 分冷却した結果を示している。

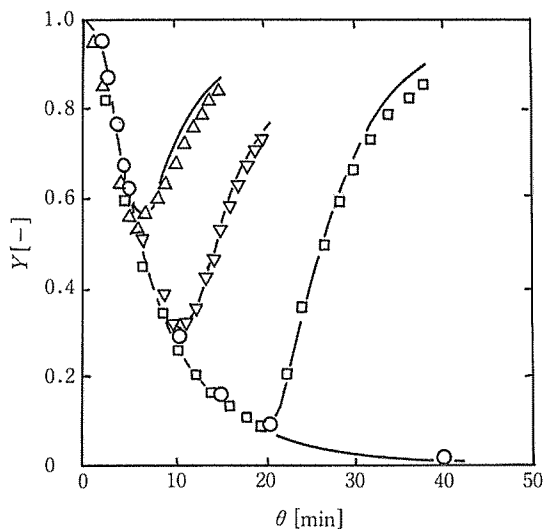


Fig. 1 Relations among the dimensionless temperature Y [-] and the cooking time θ [min]

Sample: potato; Observed values t_0, t_{he}, t_{ce} = 20, 100, 20°C (○, □, ▽, △); Calculated values: α = 0.085 cm²/min (—)

試料を加熱湯中から冷却水中に移した場合の温度変化の測定結果は、中心部に熱電対を加熱、冷却面から挿入しており、熱電対を通しての伝導伝熱と、熱電対の先端の試料の移動による変動が起り精度がよい測定が困難であった。そこで別途の実験を行って α の値を精度よく求めておき、式(6)を差分式として計算により温度変化を求め、速度パラメータの計算に供することにした。Fig. 1 に示す曲線は、本研究で使用した α の値 $0.085 \text{ cm}^2/\text{min}$ を用いた計算値である。実験データとよい傾向の一致を示している。Fig. 1 に示す実験データから α の値を求めると $0.098 \sim 0.110 \text{ cm}^2/\text{min}$ と僅かに大きい値となった。熱電対からの伝導伝熱と先端が僅かにずれるかして大きい値が得られたと考えられる。

クッキング速度の測定 クッキング率 $x[-]$ の経時変化を測定した結果を Fig. 2 および Fig. 3 に示す。Fig. 2 は、加熱処理後に冷却水中に入れないで大気中に取り出して1.5~2分後に測定した結果である。加熱湯中から取り出したときの時間(測定クッキング時間とする)をクッキング時間とした場合と、これに取り出し後の経過時間2分を加えた時間(修正クッキング時間とする)をクッキング時間とした場合とを比較して示している。速度パラメータの計算には後者の実験データを使用する方がよいと考えられる。曲線は後で示す計算結果である。Fig. 3 は、加熱処理後に 20°C の冷却水中に5分入れて冷却して測定した結果を示したものである。冷却をしないで1.5~2分後に測定した結果と合わせて比較して示している。曲線は後で示す計算結果である。

速度パラメータの計算 試料の中心部における温度変化を α の値 $0.085 \text{ cm}^2/\text{min}$ から求め、Fig. 2 に示すクッキング率変化の測定結果から、式(2)または式(3)と、式(4)とに含まれる速度パラメータの値を求める計算を行った。非等温の実験データに対するパラメータを求める方法として岡崎ほか(1991, 1992)による方法などがあるが、本研究では、前報(張ほか, 1993)で用いた簡単な BASIC プログラムを用いてパラメータを試行錯誤して求める方法を用いた。次式で示す標準偏差の値を最小にする速度パラメータの値を求めた。

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^N (x_{\text{obs}} - x_{\text{cal}})_i^2 / N \right]^{1/2} \quad (7)$$

ここで、 $\sigma [-]$ は標準偏差、 $N[-]$ は測定値の数、添字 obs, cal は測定値、計算値を示す。本研究では、前報(張ほか, 1993)と同様に $n=1, m=1, \beta=0.1$ として、 $E \times 10^{-4}$ を小刻みに変えて標準偏差 σ の値が最小になる $\log A$ の値を求める計算を行った。得られた結果を Table 1 に示す。

Table 1 に示す標準偏差 σ の値の比較から、べき乗型速度式(2)を仮定した場合には、測定クッキング時間に対して活性化エネルギー $E \times 10^{-4}$ が0.50、修正クッキング時間に対して $E \times 10^{-4}$ が0.75がよいとい

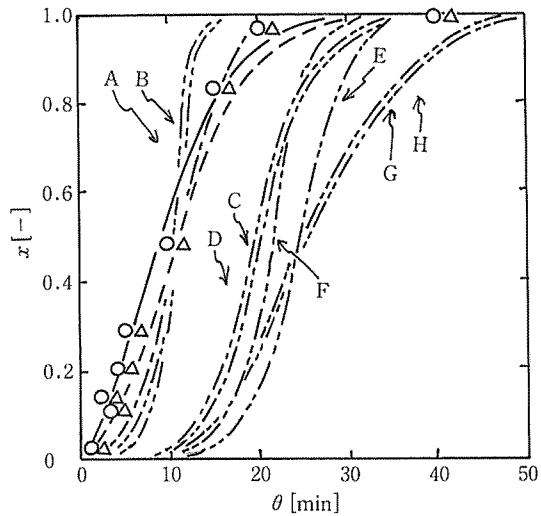


Fig. 2 Relations among the cooking ratio $x[-]$ and the cooking time $\theta[\text{min}]$

Sample: potato; Observed values: For measured and corrected cooking time (\circ and Δ); Calculated values for Eqs. (2), (4) and (6): For measured cooking time ($\log A=2.3110, E \times 10^{-4}=0.50 \text{ cal/g-mol}$) (—), For corrected cooking time ($\log A=3.8061, E \times 10^{-4}=0.75 \text{ cal/g-mol}$) (---); Others: ZHANG *et al.*, 1993 (---), KUBOTA *et al.*, 1988 (A), OKAZAKI *et al.*, 1992 (B), MATSUURA *et al.*, 1989 (C), KASAI *et al.*, 1985 (D), KUBOTA *et al.*, 1978 (E), KUBOTA *et al.*, 1981 (F), OKAZAKI *et al.*, 1991 (G), KOZEMPEL, 1988 (H)

う結果になる。これらによる計算値を実験データと比較して Fig. 2 に破線と実線とで示す。一点鎖線は、前報（張ほか，1993）において得られた $E \times 10^{-4}$ が 1.5 の場合の計算値を示したものである。本実験の結果とよく似た結果を示している。

前報において活性化エネルギー E の値が従来の値より小さくなったが、本研究においては更に小さくなっており興味深い結果になっている。Table 1 に示す結果の比較をすると、S字型速度式(3)を仮定する場合には、べき乗型速度式(2)を仮定する場合よりも、 E の値が更に小さくなる結果になっている。これはS字型定数 β が低温域での計算値を小さくする効果があるためと考えられる。

Fig. 1 に描いている Table 1 に示す速度パラメータによる曲線と、実験データの点とを比較してみても、実験データの点数が多くなればらつきが大きいことがわかる。Table 1 に示す σ の値の僅かな差による比較から、クッキング速度式(2)と(3)のいずれがよいか、また、Table 1 に示す E の値のいずれがよいかを判断するのは好ましくないと考えられる。実験データのばらつき幅から考えると、かなりの許容幅があると考えられる。本研究では、取り合えず簡単なべき乗型速度式を用いて、修正クッキング時間に対して得られた結果がよいとして、これを用いて Fig. 3 に対する計算を示す。前報（張ほか，1993）で述べたように、本研究で示す非等温実験結果は、得られる測定点が少なく、低温域における実験データの計算における重みが小さくなるため、速度式の型とか n, m, β, E の値を判断するのは好ましくないと考えられる。

本研究において、活性化エネルギー E の値が既往の値よりも小さくなっているのは、クッキング速度の測定を加熱温度下で行っているため、測定温度上昇による軟化が起り、デンプン糊化温度以下でもクッキングがかなり進行したことによる結果になっているためと考えられる。

Fig. 2 に前報（張ほか，1993）で詳しく紹介した既報の速度パラメータによる計算結果を二点鎖線で示す。前報と曲線A（久保田ほか，1988）と曲線B（岡崎ほか，1992）とが本実験結果に近い結果となっている以外は、いずれも低温域における速度が小さくなっていることがわかる。前報でも考察したように、ジャガイモはクッキング率の低いところでは、薄片にして十分に冷却するとか、表面を乾燥しやすくするとか、溶出する軟化成分ができているとすれば溶出させるようにするとか、衝撃貫通応力法などを使うとかすると、いずれかの影響で暫く初期値より硬くなったりする現象を示すことがあると考えられる。細胞組織が引き締まり破断的な外力に対して強靱になるのではないかと考えられる。

前報（張ほか，1993）と本実験では、試料が大きく、冷却水中に入れても中心部では暫く温度が上昇して冷却が起りにくく、水分も内部にこもって、低温域でも細胞組織か細胞間組織かが軟かくなって貫入的な外力に対して崩れやすくなっているのではないかと考えられる。曲線Aは、マイクロ波加熱を行ったものである。中心部をすばやく切り出して薄片にして冷却水中に投入しているが、軟かくなっている。これはマイクロ波による特殊効果が起って、組織が崩れた状態になっているためではないかと考えられる。岡崎ほか

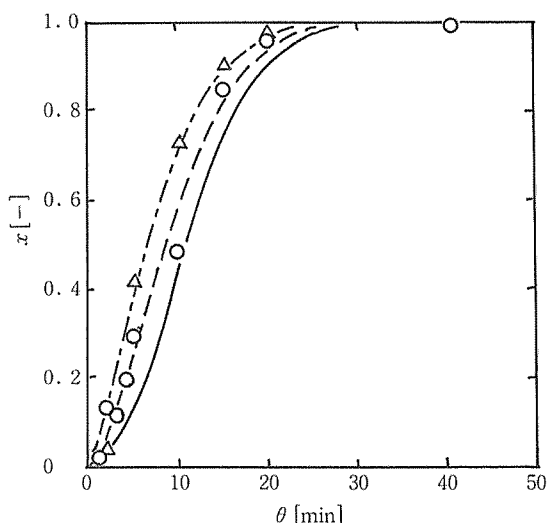


Fig. 3 Relations among the cooking ratio $x[-]$ and the cooking time $\theta[\text{min}]$

Sample: potato; Observed values for measured cooking time: No cooling, over heating 1.5~2 min and used cooling water at 20°C for 5 min (O and Δ); Calculated values for Eqs. (2), (4) and (6), used $\log A=3.8061$, $E \times 10^{-4}=0.75$ cal/g-mol.; For measured cooking time (—), For over heating time 2 min (---), For cooling time 5 min, 20°C (- - -)

(1991, 1992) は、非等温解析法の違いで、同じ実験値に対してクッキング速度が2桁位違っていて、曲線 B, G との比較検討の前に再考が必要である。

Fig. 3 に示す曲線は、べき乗型速度式(2)において、修正クッキング時間に対して得られた速度パラメータ $\log A=3.8061$, $E \times 10^{-4}=0.75$ cal/g-mol, $n=1$ を用いた計算結果である。加熱時間が測定時間を2分越えた場合と、20°C の冷却水中に5分入れた場合とに対する温度変化を、 α の値 $0.085 \text{ cm}^2/\text{min}$ を用いて求めて行った計算である。破線は加熱が2分越えた場合、一点鎖線は冷却を5分行った場合の結果であるが、いずれも実験値とよい一致を示している。本実験と速度パラメータの算出法とが妥当であることを示しているものと考えられる。

結 言

これまでにジャガイモを例として、クッキング速度に関する多くの研究 (KUBOTA *et al.*, 1978, 久保田ほか, 1981, 1988, 張ほか, 1993など) が行われてきているが、速度パラメータの値が異なってきた。前報 (張ほか, 1993) において、クッキング率を求めるときのレオロジー特性の測定法の違いなどによる影響があると考えられる結果を得た。

本研究では、加熱処理後の冷却処理と測定温度の影響がないかについて調べる研究を行った。クッキング速度の測定を加熱条件下と冷却後温度下とで行って比較検討した。クッキング進行中におけるクッキング速度が測定温度を変えると異なってくると考えられる結果を得た。加熱温度下でクッキング速度を測定した場合、次に示すクッキング速度式を得た。

$$dx/d\theta = A \cdot \exp[-E/(Rg \cdot T)](1-x)^n$$

$$A = 6.398 \times 10^3 \text{ min}^{-1}, E = 7.50 \times 10^3 \text{ cal/g-mol}, n = 1$$

ここで、 $x[-]$: クッキング率, θ [min]: クッキング時間, T [°K]: クッキング温度, $Rg=1.987$ cal/(g-mol·°K) である。

得られた活性化エネルギー E の値が、前報の値 1.50×10^4 cal/g-mol よりも更に小さくなる結果になった。ジャガイモの軟化がデンプン糊化と、測定温度上昇による細胞組織か細胞間組織かが軟くなる現象とによって起こっているためと考えられる。

謝辞 本研究は、平成5年10月1日の京都市(京都大学)における化学工学会第26回秋季大会で報告させて頂く予定である。本研究の一部は、中塾研究奨励会と広島県食品工業振興財団の援助をうけたものである。付記させて頂いて謝意を表す。

前報 (張ほか, 1993) の Fig. 4 の(9)の直線に誤りがあり、文献 (KUBOTA *et al.*, *J. Food Sci.*, 44, 1394-1397 (1979)) によりご訂正を賜りたい。

Table 1 Calculated values of the rate parameters $\log A$ and $E \times 10^{-4}$ and the standard deviation σ

For measured cooking time:

Assuming: Eqs. (2), (4) and (6), $\alpha=0.085 \text{ cm}^2/\text{min}$, $n=1$

$E \times 10^{-4}$	$\log A$	σ
0.25	0.6251	0.0551
0.50	2.3110	0.0435
0.75	3.9731	0.0582
1.0	5.6136	0.0781
1.5	8.8497	0.1077

For corrected cooking time:

Assuming: Eqs. (2), (4) and (6), $\alpha=0.085 \text{ cm}^2/\text{min}$, $n=1$

$E \times 10^{-4}$	$\log A$	σ
0.25	0.4927	0.0882
0.50	2.1623	0.0539
0.75	3.8061	0.0432
1.0	5.4275	0.0551
1.5	8.6187	0.1355

Assuming: Eqs. (3), (4) and (6), $\alpha=0.085 \text{ cm}^2/\text{min}$, $m=1, \beta=0.1$

$E \times 10^{-4}$	$\log A$	σ
0.05	-0.03646	0.0417
0.10	-0.0286	0.0412
0.25	0.9717	0.0501
0.50	2.6182	0.0742
1.0	5.8712	1.1086

where, A [min⁻¹], E [cal/g-mol], σ [-]

使用記号

A : 式(4)のパラメータ	E : 式(4)のパラメータ	F : 定速貫通応力 [N]
k_n : 式(2)のパラメータ	k_p : 式(3)のパラメータ	m : 式(3)のパラメータ
N : 測定値の数 [-]	n : 式(2)のパラメータ	Rg : 気体定数 [cal/(g-mol·°K)]
T : クッキング温度 [°K]	t : クッキング温度 [°C]	x : クッキング率 [-]
Y : 無次元化温度 [-]	y : 試料内の位置 [cm]	α : 熱拡散率 [cm ² /min]
β : 式(3)のパラメータ	θ : クッキング時間 [min]	σ : 標準偏差 [-]

添字

o, e, he, ce : 初期値, 平衡値, 加熱湯, 冷却水

obs, cal : 測定値, 計算値

引用文献

- 張 戈・久保田清・羽倉義雄, 1993, ジャガイモのクッキングにおける温度変化とクッキング速度に関する研究. 広島大学生物生産学部紀要, 32 : 23-31.
- 香西みどり・島田淳子, 1985, 煮熟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.
- KOZEMPEL, M. F., 1988, Modeling the Kinetics of Cooking and Precooking Potatoes. *J. Food Sci.*, 53 : 753-755.
- KUBOTA, K., OSHITA, K., HOSOKAWA, Y., SUZUKI, K. and HOSAKA, H., 1978, Studies of Cooking-rate Equation of Potato and Sweet Potato Slices. *J. Fac. Fish. Anim. Husb., Hiroshima Univ.*, 17 : 97-106.
- KUBOTA, K., 1979, Determination of the Empirical Rate Equation for the Chemical and Physical Transformations of Foods. *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 18 : 11-30.
- 久保田清・保坂秀明, 1981, 球状ジャガイモの伝熱特性を考慮したクッキング速度式の設定に関する研究. 日食工誌, 28 : 181-185.
- 久保田清・黒川眞行・鈴木寛一・江坂宗春, 1988, 円柱状ジャガイモのマイクロ波加熱におけるクッキング速度式の設定に関する研究. 日食工誌, 35 : 78-82.
- 松裏容子・香西みどり・畑江敬子・島田淳子, 1989, 野菜の最適加熱時間の予測. 日食工誌, 36 : 97-102.
- 岡崎 尚・鈴木寛一・前重静彦・久保田清, 1991, 蒸煮によるジャガイモの軟化現象に関する速度論的解析. 日食工誌, 38 : 784-788.
- 岡崎 尚・鈴木寛一・前重静彦・久保田清, 1992, 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.

Kinetic Study for the Cooking Rate of Potato during Cooking Processing

Ge ZHANG, Kiyoshi KUBOTA and Yoshio HAGURA

*Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University
Higashi-Hiroshima 724 Japan*

In previous papers, the cooking rate parameters of potatoes were differed. In this paper, we were measured the cooking ratios of potato by using the constant velocity penetration method under the hot condition of cooked samples and the cooled condition.

The values of cooking ratio of the samples during the cooking process were differed to the measuring temperature. The cooking-rate equation obtained under the hot condition was as follows:

$$dx/d\theta = A \cdot \exp[-E/(Rg \cdot T)](1-x)^n$$

$$A = 6.398 \times 10^8 \text{ min}^{-1}, E = 7.50 \times 10^3 \text{ cal/g-mol}, n = 1$$

where, $x[-]$: cooking ratio, $\theta[\text{min}]$: cooking time, $T[^\circ\text{K}]$: cooking temperature, $Rg = 1.987 \text{ cal/(g-mol} \cdot ^\circ\text{K)}$. The value of activation energy obtained was lower than the value of $1.50 \times 10^4 \text{ cal/g-mol}$ obtained in previous paper which measured the cooking ratio under the cooled condition. We can consider that the softening behavior of potatoes occurred by the cooking phenomena and the measuring temperature changes, and conclude that the softening behavior occurred for the samples of high measuring temperature method during the uncooked temperature.

Key words: cooking, food, potato, rate equation