

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

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4月30日 受付

要 旨 食品を各種加工処理する装置, プロセスの設計, 操作計算を行っていくためには, 簡単なモデルに基づいたクッキング速度式(久保田ほか, 1981-B, 1988など)を設定していくことが必要となる。これまでにジャガイモを例として, クッキング速度式の設定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。

本研究では, 円柱状ジャガイモを例として, 加熱湯中クッキングにおける温度変化を測定し, クッキング速度式の設定を行って, これまでに得られてきている速度パラメータとの比較検討を行った。

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, 試料内部の温度変化, クッキング率, 乾燥率などを測定して, 簡単なモデル化を行って, クッキング速度式(久保田ほか, 1981-B, 1988など), 乾燥速度式(姫ほか, 1992)などを設定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多くの研究に使用されてきている。試料内部の温度変化は, クッキング, 乾燥速度式などを設定する場合に考慮することが必要となる。ジャガイモを例とした研究として, 熱拡散率を平板状(KUBOTA *et al.*, 1983), 直方体と円柱状(KUBOTA *et al.*, 1985), 球状(久保田ほか, 1981-A)の試料に対して求める研究など(MATTHEWS *et al.*, 1968, 山田ほか, 1970, RAO *et al.*, 1975, LAMBERG *et al.*, 1986, RICE *et al.*, 1988: これらの文献は呂ほか, 1990を参照下さい)がある。最近, 呂ほか(1990)が, 熱電対の先端がずれることによる補正をして熱拡散率を精度よく求める方法を提案し, これまでにジャガイモに対して得られてきている文献からの熱拡散率との比較検討を行っている。

ジャガイモを例としたクッキング速度式の設定については, 平板状(KUBOTA *et al.*, 1978), 球状(久保田ほか, 1981-B)の試料について加熱湯中におけるクッキング速度式の設定, 円板を3枚重ねた円柱状の試料についてマイクロ波加熱におけるクッキング速度式の設定(久保田ほか, 1988)を行ってきた。また, バレイショ澱粉の糊化速度式の設定(KUBOTA *et al.*, 1979-B)についても研究を行ってきた。ジャガイモの湯中加熱のクッキングについては, 多くの研究者によって速度パラメータの値が報告(香西ほか, 1985, KOZEMPEL, 1988, 松裏ほか, 1989, 岡崎ほか, 1991, 1992)されてきている。ジャガイモの加熱クッキングにおける速度パラメータの値は, 試料の品種, 保蔵条件, 成分(含水率など), 大きさ, 形状とか, 加熱方法(加熱湯中, 油中, 水蒸気中, 遠赤外線中, マイクロ波加熱など), 加熱速度, 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。

本研究では, 円柱状ジャガイモを加熱湯中で片底面から加熱するクッキングを行って, 試料中心部の温度変化とクッキング率の変化の測定をした。クッキング速度式の速度パラメータを求め, これまでに文献に示されている速度パラメータの値と比較検討を行った。

実 験 方 法

試料 市販のジャガイモ(北海道産マークイン)を用い, コルクボーラとカッターで直径 2.6 cm, 長さ

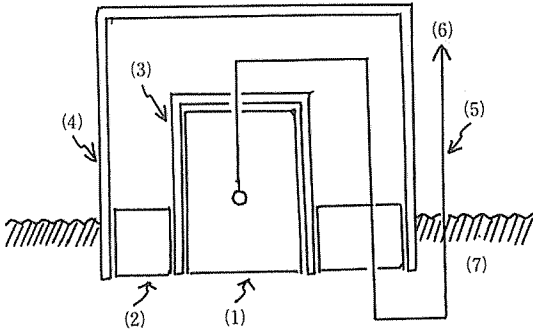


Fig. 1 Sample and holder used hot-water cooking (1) sample: potato (diameter: 2.6 cm, length: 2.6 cm), (2) silicone plug (thickness: 1.8 cm), (3) Teflon vessel (I. D.: 2.6 cm, O. D.: 3.0 cm, depth: 3.0 cm), (4) TPX (methyl pentene resin) beaker (diameter: 6.7 cm, length: 6.8 cm), (5) thermocouple (diameter of chromel and alumel wires: 0.15 mm); set at center of sample, (6) recorder, (7) hot water bath

2.5 cm の円柱状にしたものを試料として供した。Fig. 1 に示すように試料を固定して、95°C の加熱湯に入れ、円柱状の試料の片底面から加熱するクッキングを行った。

温度変化の測定 Fig. 1 に示すようにアルメル・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て加熱湯中のクッキングにおける試料内部の温度の経時変化を測定した。クッキング率の経時変化を測定するときには熱電対を挿入しないで行った。

クッキング率の測定 クッキング率は、所定時間加熱クッキングをした試料をすばやく Fig. 1 に示す固定容器から取り出して、23°C の水中で 5 分冷却し、レオロジー特性の変化を測定することによって求めた。レオロジー特性の測定は、KUBOTA *et al.* (1984) による手作り製のレオロジー特性測定装置を使用して行った。直径 4 mm の円柱状プランジャーが定速 (2.61 cm/min) で貫入していくときの所定位置における貫通応力 $F[N]$ の値として求めた。

クッキング率とクッキング速度式

クッキング率 試料をクッキングすると各種の成分、物性などが変化する。クッキング率はどのような成分、性状の変化に着目して求めるかで異なってくることになる。本研究では、円柱状プランジャーが定速で貫入していくときの所定位置における貫通応力を用いてクッキング率を次式により表わす。

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

ここで、 $F[N]$ はクッキング時間 $\theta[\text{min}]$ における試料内部の所定位置における定速貫通応力、 $x[-]$ はクッキング率である。また、 $F_0[N]$ 、 $F_e[N]$ 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 これまでにクッキング、乾燥速度式などとして使用してきた次に示す汎用的な経験的速度式 (KUBOTA, 1979-A) の適用を試みる。

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

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

ここで、 k_n 、 k_β 、 n 、 m および β 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。クッキング率 $x[-]$ とクッキング時間 $\theta[\text{min}]$ との関係が単調なべき乗型曲線になる場合に対しては式(2)が、また、S字型曲線になる場合に対しては式(3)が利用できる。

式(2)、(3)における k_n 、 k_β は、次に示す Arrhenius 式で表わされる値である。

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

ここで、 $T[^\circ\text{K}] = t[^\circ\text{C}] + 273.2$ は試料内部の所定位置におけるクッキング温度、 R_g は気体定数 1.987 cal/(g-mol·°K) である。 $A[\text{min}^{-1}]$ と活性化エネルギー $E[\text{cal/g-mol}]$ 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。

実験結果と考察

試料の温度変化 試料の中心位置における温度変化を Fig. 1 に示す方法で測定した結果を Fig. 2 に示す。95°C の加熱湯中で片底面からの加熱をした。試料の中心位置での Fig. 1 に示す平衡温度が 83°C になっているのは、試料の周辺部からの放熱が僅かながら起こっていたためと考えられる。縦軸の Y の値は、次式によって得られる値である。

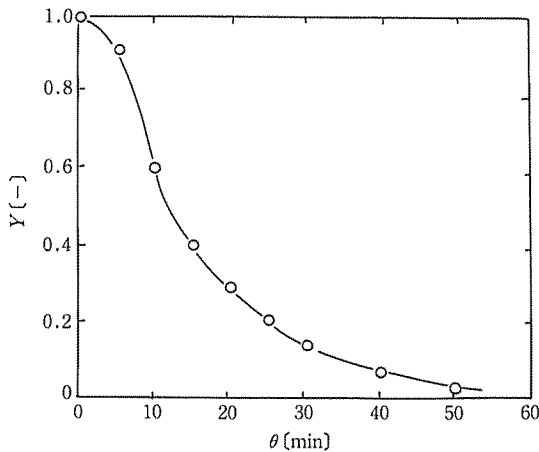


Fig. 2 Relations among the dimensionless temperature $Y[-]$ and the cooking time $\theta[\text{min}]$

Sample: potato of Fig. 1 (heated from one side of base), Holder: Fig. 1, Temperature: $t_0=25^\circ\text{C}$, $t_e=83^\circ\text{C}$

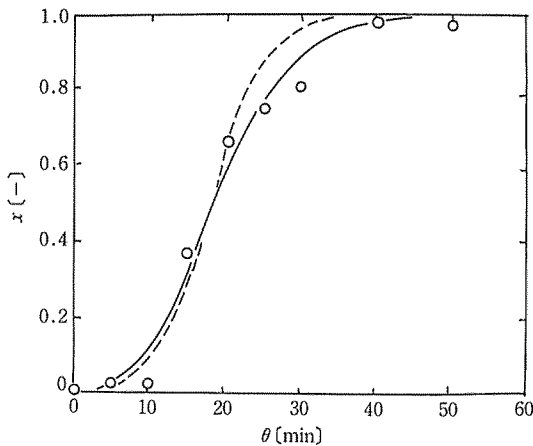


Fig. 3 Relations among the cooking ratio $x[-]$ and the cooking time $\theta[\text{min}]$

Sample: potato of Fig. 1 (heated from one side of base), Holder: Fig. 1, Temperature: Fig. 2, Solid curve: Eq. (2) and (4), Broken curve: Eq. (3) and (4)

$$Y = (t - t_e) / (t_0 - t_e) \quad (5)$$

ここで、 $t[^\circ\text{C}]$ はクッキング時間 $\theta[\text{min}]$ における試料内部の所定位置の温度、 $Y[-]$ は無次元温度、 $t_0[^\circ\text{C}]$ 、 $t_e[^\circ\text{C}]$ は、試料の初期および平衡時における値である。クッキングを所定時間行った後、試料を Fig. 1 に示す固定容器から取り出して 23°C の水中で 5 分間冷却してレオロジー特性の測定に供した。冷却をすばやく行うために固定容器から取り出して冷却を行った。冷却時間を 3 分と 5 分と変えて行って測定したレオロジー特性の結果が誤差の範囲内であったので、5 分に設定した。

クッキング速度の測定 試料の中心位置におけるクッキング率 $x[-]$ の経時変化を式(1)を用いて求めた結果を Fig. 3 に示す。試料の中心位置での定速貫通応力は、試料を薄片にしないで、加熱底面側から円柱状プランジャーを貫入していき、中心位置を貫通するときの応力の値として求めた。円柱状プランジャーの側面が試料と摩擦することによる測定値への影響があるかを調べる実験を試料の長さを変えて行った。試料の長さが $1.5\sim 3.0\text{ cm}$ の間で中心部における応力の値に誤差の範囲内で差異がみられなかったことから問題ないとして、試料の長さを 2.5 cm とした。試料の長さが 0.5 cm 以下になると応力の値が小さくなったが、これは試料に歪み割れが発生したためと考えられた。また、試料の長さが大きい場合、貫入開始の $0.3\sim 0.4\text{ cm}$ と貫通終了前の $0.2\sim 0.3\text{ cm}$ においても応力の値が小さくなったが、これも試料に歪み割れが発生したためと考えられた。試料の長さを 2.5 cm とし、中心部の値だけを評価することにした。クッキング時間の進行に伴って加熱底面側から応力の値が低下していく結果が得られ、クッキングが加熱底面側から進行していく現象が示される結果が得られた。実線と破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 t または無次元温度 Y と時間 θ との関係として得られた Fig. 2 に示す結果とクッキング率 x と時間 θ との関係として得られた Fig. 3 に示す結果とから、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する。非等温の実験データであるため解析が複雑となる。

球状ジャガイモの中心部におけるクッキング速度式の速度パラメータの値を求めた久保田ほか (1981-B) による方法がある。これは非線形最小二乗法のサブルーチンを用いた FORTRAN プログラムによる方法で、クッキング温度とクッキング率の経時変化として得られる実験データの値を計算値と比較して得られる標準偏差の値が最小になるようにする計算方法である。伝熱方程式を連立させて解いて、熱拡散率の値をクック

ング速度式における速度パラメータと合わせて求めている。実験データが精度良く得られなく大きくばらつく場合には、パラメータが相関して良くないと考えられる。熱拡散率の値が既報の値(呂ほか, 1990)より僅かに大きくなっている。また、実験データが精度良く得られる場合には、簡便で、迅速で良いなどの利点が考えられるが、パソコンの利用しかできなくて簡単な BASIC プログラムで実験データの解析をしている者には不向きである。パソコンを利用したものとしては、岡崎ほか(1991, 1992)による Z 値を与えてクッキング値を用いる方法と非等温期間の加熱時間を等温加熱時間に修正する方法などがある。

本研究では、簡単な BASIC プログラムを用いて、速度パラメータを試行錯誤して求める方法を試みた。クッキング率 x とクッキング時間 θ との関係として得られた Fig. 3 に示す実験データの値と、式(4)を式(2)または式(3)に代入して、速度パラメータを与えて Runge-Kutta 法で計算して得られる計算値とを比較して得られる次式で示す標準偏差の値を最小にするように速度パラメータを求めた。本研究では、Fig. 2 に示すクッキング温度を内挿計算を行って実験データとして与えた。

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^N (x_{\text{obs}} - x_{\text{cal}})_i^2 / N \right]^{1/2} \quad (6)$$

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、非等温の実験データを取り扱う計算であるため、 n, m および β の値を精度良く求めることが困難であり、既往の研究を参考にして $n=1, m=1, \beta=0.1$ として与えることにした。速度パラメータ A と E とを与えて標準偏差 σ の値を求めて既往の結果と比較検討をすることにした。既往の研究で得られてきている速度パラメータの値を使って計算した場合の標準偏差の値の比較を Table 1 に示す。速度パラメータ A および E は、非線形最小二乗法を行う場合に都合が良い表示にし $\log A$ および $E \times 10^{-4}$ として示す。

Table 1 に示す香西ほか(1985)は、立方体状試料 $1 \times 1 \times 1$ cm で温度を $80 \sim 99.5^\circ\text{C}$ で行った等温クッキング実験である。試料を 15°C 、1分間水冷して等温扱いをして、クッキング率を、直径 5 cm の平板状プランジャーを用い、クリアランス 2.5 mm とした圧縮圧力より求めている。KOZEMPEL (1988) は、立方体状試料 $0.95 \times 0.95 \times 0.95$ cm で温度を $74 \sim 85.5^\circ\text{C}$ で行った等温クッキング実験である。試料を 27°C 、3分間水冷して等温扱いをして、クッキング率を深さ 7.6 cm の容器に入れてクリアランスを 1.11 cm とした圧縮圧力より求めている。松裏ほか(1989)は、立方体状試料 $1 \times 1 \times 1$ cm で温度を $85 \sim 99.5^\circ\text{C}$ で行った等温クッキング実験である。試料を 15°C 、30秒間水冷して等温扱いをして、クッキング率を V 型プランジャーでクリアランスを 2 mm とした圧縮圧力より求めている。岡崎ほか(1991)は、円柱状試料 $0.7 \text{ cm} \phi \times 3 \text{ cm}$ で温度を $85 \sim 105^\circ\text{C}$ で行った非等温解析した実験である。試料を 25°C 、5分間水冷して、クッキング率を厚さ 0.5 cm に切って直径 2.0 cm の平板状プランジャーを用い破断する最大応力より求めている。岡崎ほか(1992)は、岡崎ほか(1991)で得られた実験データを用い、非等温解析の方法を変えた報告である。久保田ほか(1988)は、円板状試料 $0.3 \phi \times 3.2 \text{ cm}$ を 3枚重ねて円柱状にしたものをマイクロ波加熱した非等温解析した実験である。温度をサーモラベルを円板状の試料間に入れて測定している。中央部の円板状試料を 30°C 、1分間水冷して、クッキング率を直径 3 mm の円柱状プランジャーを用いて得られる定速貫通応力より求めている。KUBOTA *et al.* (1978) は、平板状試料 $2 \times 2 \times 0.3 \text{ cm}$ で温度を $80 \sim 99.5^\circ\text{C}$ で行った等温クッキング実験である。試料を 30°C 、1分間水冷して等温扱いをして、クッキング率を直径 4 mm の円柱状プランジャーを用いて得られる衝撃貫通応力

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

Assuming cooking-rate equations: Eq. (2) and (4), $n=1$

$\log A$	$E \times 10^{-4}$	σ	papers
19.8745	3.457	0.5092	KASAI <i>et al.</i> , 1985
16.8928	3.034	0.5754	KOZEMPEL, 1988
19.8445	3.466	0.5274	MATSUURA <i>et al.</i> , 1989
19.7419	3.513	0.6005	OKAZAKI <i>et al.</i> , 1991
23.7782	3.824	0.1544	OKAZAKI <i>et al.</i> , 1992
10.9600	1.828	0.0773	KUBOTA <i>et al.</i> , 1988

Assuming cooking-rate equations: Eq. (3) and (4), $m=1, \beta=0.1$

$\log A$	$E \times 10^{-4}$	σ	papers
16.9983	2.960	0.5952	KUBOTA <i>et al.</i> , 1978
17.1004	2.940	0.5558	KUBOTA <i>et al.</i> , 1981-B

where, $A[\text{min}^{-1}]$, $E[\text{cal/g-mol}]$, $\sigma[-]$

Table 2 Calculated values of the rate parameters $\log A$ and $E \times 10^{-4}$ and the standard deviation σ

Assuming: Eq. (2) and (4), $n=1$

$E \times 10^{-4}$	$\log A$	σ
1.0	5.3727	0.0705
1.5	8.6914	0.0664
2.0	11.9904	0.0781
2.5	15.2800	0.0924
3.0	18.5713	0.1053

Assuming: Eq. (3) and (4), $m=1, \beta=0.1$

$E \times 10^{-4}$	$\log A$	σ
1.0	5.8619	0.1022
1.5	9.2082	0.1208
2.0	12.5283	0.1332
2.5	15.8174	0.1418
3.0	19.0882	0.1481

より求めている。久保田ほか (1981-B) は、半径 1.9 cm の球状試料で温度を 16~60°C に上昇させる非等温クッキング実験である。中心部分を厚さ 2.9~3.1 mm の平板状に輪切りをして 30°C、1 分間水冷して、クッキング率を直径 4 mm の円柱状プランジャーを用いて得られる衝撃貫通応力より求めている。

Table 1 に示す標準偏差 σ の値の比較から、本研究で得られた実験データは、KUBOTA *et al.* (1978) および久保田ほか (1981-B) による S 字型式 (3) を用いて速度パラメータを求めている加熱湯によるクッキングで得られた結果と異なり、べき乗型式 (2) を用いて速度パラメータを求めている岡崎ほか (1992) による加熱湯によるクッキングで得られた結果と久保田ほか (1988) によるマイクロ波加熱によるクッキングで得られた結果に近い結果になっていることがわかる。岡崎ほか (1992) による結果と久保田ほか (1988) による結果は、活性化エネルギーの値 E が大きく異なっているが、本研究の実験データがいずれに近い

かは Table 1 の結果だけからは判断できない。

本研究で得られた実験データは、大きくばらついていて、非線形最小二乗法を用いて $\log A$ と $E \times 10^{-4}$ を同時に計算するために必要となる初期値を推察することが困難となる。Table 1 に示す既往の値を初期値とする計算を試みたが、局所的な変化しなくして大きく値が変化しない結果となった。そこで、クッキング速度式をべき乗型式 (2) と S 字型式 (3) とをそれぞれ仮定をして、 $E \times 10^{-4}$ を 0.5 刻みで変えて標準偏差 σ の値が最小になる $\log A$ の値を求める計算を行った。試行錯誤で可能な計算である。得られた結果を Table 2 に示す。

Table 2 に示す標準偏差 σ の値の比較から、べき乗型式 (2) を仮定した場合には、 $E \times 10^{-4}$ が 1.5、また、S 字型式 (3) を仮定した場合には、 $E \times 10^{-4}$ が 1.0 としたときがよいという結果になっている。これらによる計算値を実験データと比較して Fig. 3 にそれぞれ実線と破線で示す。べき乗型式 (2) の方がよいという結果になっている。また、既往の研究で得られている速度パラメータと比較して、Arrhenius 線図を Fig. 4 に示す。活性化エネルギーの値が、加熱湯によるクッキングで得られた岡崎ほか (1992) による結果よりもマイクロ波加熱によるクッキングで得られた久保田ほか (1988) による結果に近いという興味深い結果になっている。クッキング率を求めるためのレオロジー特性の測定法の違いなどによるのではないかと考えられる。

また、久保田ほか (1981-B) による結果は、 $\log A$ と $E \times 10^{-4}$ と熱拡散率を同時に求める計算を行ってパラメータが相関をしていると考えられるので、参考とするため、本研究で示してきた方法で $E \times 10^{-4}$ と $\log A$ を求める計算を試みた。その結果、べき乗型式 (2) を仮定した場合には、 $E \times 10^{-4}=3.0$, $\log A=17.0331$, $\sigma=0.0625$, また、S 字型式 (3) を仮定した場合には、 $E \times 10^{-4}=2.5$, $\log A=14.4919$, $\sigma=0.0331$ となった。本研究による結果と異なり、KUBOTA *et al.* (1978) と同様に S 字型式 (3) の方がよく、活性化エネルギーが大きくなる結果になっている。これもレオロジー特性の測定法の違いなどによるのではないかと考えられる。

参考として、パレイシヨ澱粉の糊化に関する既往の結果を Fig. 4 に示す。KUBOTA *et al.* (1979-B) は、3% のパレイシヨ澱粉を用い、温度を 58~75°C で行った等温糊化実験である。糊化率を流動パラメータから求めている。PRAVISAN *et al.* (1985) は、ジャガイモにおける澱粉の糊化速度を温度を 64~73.2°C で動的 DSC 法で求めている。67.5°C で活性化エネルギーが変化する結果を得ている。両者共に、澱粉の糊

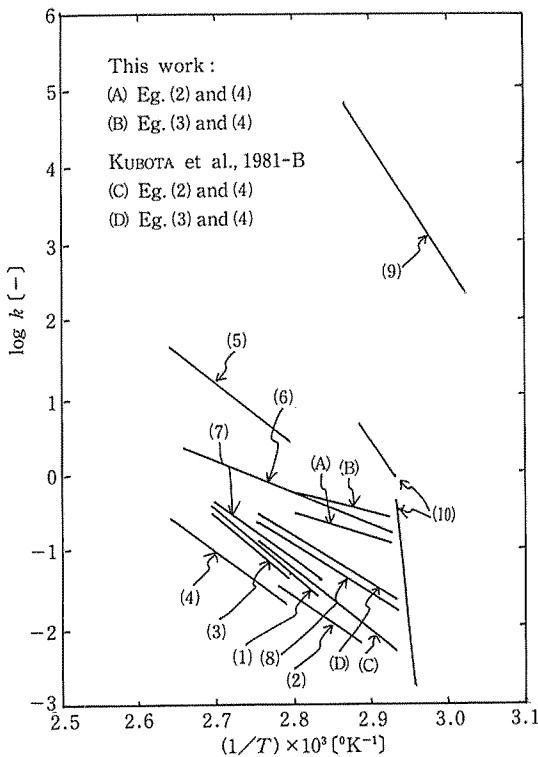


Fig. 4 Arrhenius plots of the cooking of potato and the gelatinization of potato starch

Previous papers: (1) KASAI *et al.*, 1985, (2) KOZEMPEL *et al.*, 1988, (3) MATSUURA *et al.*, 1989, (4) OKAZAKI *et al.*, 1991, (5) OKAZAKI *et al.*, 1992, (6) KUBOTA *et al.*, 1988, (7) KUBOTA *et al.*, 1978, (8) KUBOTA *et al.*, 1981-B, (9) KUBOTA *et al.*, 1979-B, (10) PRAVISANI *et al.*, 1985

また、加熱後の試料を徐冷するか、薄片にして冷水中で急冷するかも異なってくると考えられる。後者の場合には、組織が崩れるまでクッキングが起こっていないと組織が強靱に引き締まったり、衝撃的な力を反発させやすくなったと考えられる。

べき乗型式(2)およびS字型式(3)における速度パラメータ n , m および β は、クッキング率の経時変化の曲線の形状に関する値であるが、これらも活性化エネルギーの値と同様にレオロジー特性の測定方法の違いなどによって変わると考えられる。温度によっても著しく変わってくる値である。

本研究で行ったような非等温実験では、低温域における実験データの影響が少なく、得られる測定点が少ないため、標準偏差の値の比較だけで、べき乗式(2)とS字型式(3)のいずれが良いかとか、 n , m , β の値を変えていずれの値が良いかを判断するのは好ましくないと考えられる。前報 (KUBOTA *et al.*, 1978) で示したような等温実験を行って、非等温領域の補正を行って (岡崎ほか, 1991, 1992) 検討していくのが好ましいと考えられる。試料を圧縮破断してクッキング率を求めた場合にはべき乗型式(2)が (香西ほか, 1985, 松裏ほか, 1989, 岡崎ほか, 1991, 1992など)、また、衝撃貫通応力で求めた場合にはS字型式(3)が (KUBOTA *et al.*, 1978) 良いと報告されてきている。更に、レオロジー測定法を変えるとどうなるかが興味深い課題と考えられる。

本研究では、温度範囲が狭い、測定点が少ない非等温実験を行っていて、冷却時の速度パラメータの計算

化に関する活性化エネルギーの値が、ジャガイモのクッキングに対する値と比較して著しく大きい結果になっている。ジャガイモのクッキングは、澱粉の糊化以外に各種成分の変化、性状の変化が並発、連起しているものと考えられる。ジャガイモのクッキング率をレオロジー特性の変化で測定する場合に得られる活性化エネルギーの値は、澱粉の糊化の現象そのものに関するものでなく、それに伴う細胞構造、物性などの変化に関するものと考えられる。

クッキング速度式として、べき乗型式(2)とS字型式(3)との設定が考えられるが、以上の検討結果から、クッキング率を求めるときのレオロジー特性の測定方法の違いなどによって変わると考えられる。試料内にクッキング率分布がないとして全体を圧縮破断するか、衝撃的な貫通力をかけるとかすると、本研究で行ったように定速でゆっくり温度の測定部位を貫通させて応力を測定するのでは異なってくると考えられる。

ジャガイモのクッキングに伴うレオロジー特性の値の経時変化は、変曲点のない滑らかな曲線にならず、クッキング開始時に暫く初期値より硬くなったり、途中で段差を生じることがある (KUBOTA *et al.*, 1978, KOZEMPEL, 1988, 岡崎ほか, 1991)。クッキング開始時における初期値よりも大きい値を初期値とするか、初期値と同じにするかの取り扱いの違いでも形状が変わってくると考えられる。また、高温になると試料が崩れていき平衡値が得られなくなったり、平衡値が温度で変わったりするが、これらをどのように取り扱うかも異なってくると考えられる。

また、加熱後の試料を徐冷するか、薄片にして

への考慮をしていなく、また、熱電対の先端のずれによる誤差の発生の可能性などが考えられるが、活性化エネルギーの値が前報の結果 (KUBOTA *et al.*, 1978, 久保田ほか, 1981-B) に比較して大きく異なったことへの影響はないと考えられる。活性化エネルギーの値は、クッキング率を衝撃貫法で求めた場合は、大きく (KUBOTA *et al.*, 1978, 久保田ほか, 1981-B)、定速貫通法で求めた場合は小さく (久保田ほか, 1988) なるのではないかと考えられる。更に、加熱、冷却方法、クッキング率の測定方法などを変えるとどうなるかが興味深い課題と考えられる。

結 言

前報において、ジャガイモの加熱湯によるクッキング (KUBOTA *et al.*, 1978, 久保田ほか, 1981-B) とマイクロ波加熱によるクッキング (久保田ほか, 1988) を行ってクッキング速度式の設定を行ってきた。クッキング速度式のパラメータ値が異なった。加熱方法の違いによるのか、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によるのか興味深い結果の違いであった。

本研究では、加熱湯によるクッキングを行って、試料内部における温度とクッキング率の変化を測定し、次に示すクッキング速度式を得た。

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

$$A = 4.912 \times 10^8 \text{ min}^{-1}, \quad E = 1.500 \times 10^4 \text{ cal/g-mol}, \quad n = 1.0$$

ここで、 $x[-]$: クッキング率, $\theta[\text{min}]$: クッキング時間, $T[^\circ\text{K}]$: クッキング温度, $R_g = 1.987 \text{ cal/(g-mol} \cdot ^\circ\text{K)}$ である。

本研究で得られた活性化エネルギーの値は、加熱湯によるクッキングを行って、クッキング率を衝撃貫通法で求めて得られた値 $2.96 \times 10^4 \text{ cal/g-mol}$ よりも小さな値となり、マイクロ波加熱によるクッキングを行って、クッキング率を定速貫通法で求めて得られた値 $1.82 \times 10^4 \text{ cal/g-mol}$ の方に近い値となった。

謝辞 本研究は、平成5年9月30日-10月2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、広島県食品工業振興財団: 理事長大崎誠一の援助(1993年)をうけたものである。付記させて頂いて謝意を表す。

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_β : 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	R_g : 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 : 無次元温度 [-]	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 : 初期値, 平衡値 obs, cal : 測定値, 計算値

引用文献

- 姫 徳衛・久保田清・張 戈・羽倉義雄, 1992, 円柱状ジャガイモのマイクロ波加熱乾燥における温度変化と乾燥速度に関する研究. 広島大学生物生産学部紀要, 31 : 121-126.
- 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-A, Determination of the Empirical Rate Equation for the Chemical and Physical

- Transformations of Foods. *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 18:11-30.
- KUBOTA, K., HOSOKAWA, Y., SUZUKI, K. and HOSAKA, H., 1979-B, Studies on the Gelatinization Rate of Rice and Potato Starches. *J. Food Sci.*, 44:1394-1397.
- 久保田清・藤本真紀子・鈴木寛一・高崎かほる・保坂秀明, 1981-A, 球状根菜類系食品の熱拡散率の算出に関する研究. *日食工誌*, 28:68-73.
- 久保田清・保坂秀明, 1981-B, 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.
- KUBOTA, K., TAKASE, Y., SUZUKI, K. and ESAKA, M., 1983, A Study on the Thermal Diffusivity of Potato Slabs in Various Conditions. *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 22:141-152.
- KUBOTA, K., ESAKA, M. and SUZUKI, K., 1984, Studies on Simple Convenient Textual Instrument and on Physical Properties of Cooked Soybean. *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 23:9-24.
- KUBOTA, K., 1985, A Study on the Thermal Diffusivity of Rectangular and Cylindrical Potatoes. *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 24:1-14.
- 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.
- PRAVISANI, C. I., CALIFANO, A. N. and CALVELO, A., 1985, Kinetics of Starch Gelatinization in Potato. *J. Food Sci.*, 50:657-660.
- 呂 聯通・久保田清・鈴木寛一, 1990, 小さな試料断片を用いたジャガイモの熱拡散率の算出に関する研究. *広島大学生物生産学部紀要*, 29:25-38.

Studies among the Temperature and the Cooking-rate on Cooking of Potato

Ge ZHANG, Kiyoshi KUBOTA and Yoshio HAGURA

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

In previous papers, we have studied the cooking-rate equations for the hot-water dipped cooking and the microwave cooking of potatoes. The values of the rate parameters in the cooking-rate equations were differed. In this paper, we were measured the cooking ratio and the temperature in the inner part of potato dipped in hot water. The cooking-rate equation obtained was as follows:

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

$$A = 4.912 \times 10^8 \text{ min}^{-1}, \quad E = 1.500 \times 10^4 \text{ cal/g-mol}, \quad n = 1.0$$

where, $x[-]$:cooking ratio, $\theta[\text{min}]$:cooking time, $T[^\circ\text{K}]$:cooking temperature, $R_g = 1.987 \text{ cal/(g-mol} \cdot ^\circ\text{K)}$. The value of activation energy obtained was lower than the value of $2.96 \times 10^4 \text{ cal/g-mol}$ obtained for the hot-water dipped cooking of potato slice which used the impact-penetration method, and very similar the value of $1.82 \times 10^4 \text{ cal/g-mol}$ obtained for the microwave cooking of cylindrical potato which used the constant velocity penetration method.

Key words: cooking, food, potato, rate equation